¿QUÉ SABEMOS DE?

Cómo se comunican los animales

Gonzalo M. Rodríguez Ruiz

CSIC

CATARATA

Gonzalo M. Rodríguez Ruiz

Doctor en Biología y Conservación de la Biodiversidad por la Universidad de Salamanca. Su investigación en el Museo Nacional de Ciencias Naturales del CSIC se ha centrado en la ecología del comportamiento de los reptiles, estudiando aspectos como la comunicación química, la ecofisiología, la relación entre salud y elección de pareja, así como el efecto de las perturbaciones y la contaminación sobre la fauna.

CSIC

CATARATA

Cómo se comunican los animales

Gonzalo M. Rodríguez Ruiz

CSIC

CATARATA

Colección ¿Qué sabemos de?

COMITÉ EDITORIAL
Pilar Tigeras Sánchez, CSIC
Carmen Guerrero Martínez, CSIC
Pura Fernández Rodríguez, CSIC
Arantza Chivite Vázquez, Editorial Los Libros de la Catarata
Javier Senén García, Editorial Los Libros de la Catarata
Carmen Viamonte Tortajada, Cyan Proyectos Editoriales
Manuel de León Rodríguez, CSIC
Isabel Varela Nieto, CSIC
Alberto Casas González, CSIC
Rafael Huertas García-Alejo, CSIC

CONSEJO ASESOR
Carlos Andrés Prieto de Castro, CSIC
Dolores González Pacanowska, CSIC
Elena Castro Martínez, CSIC
Avelino Corma Canós, CSIC
Ginés Morata Pérez, CSIC
Pilar Goya Laza, CSIC
Rosina López-Alonso Fandiño, CSIC
María Victoria Moreno Arribas, CSIC
David Martín de Diego, CSIC
Miguel Ángel Puig-Samper, CSIC
Jaime Pérez del Val, CSIC
Elena García Armada, CSIC

Catálogo de publicaciones de la Administración General del Estado:
https://cpage.mpr.gob.es

Gobierno de España · Ministerio de Ciencia e Innovación · CSIC Consejo Superior de Investigaciones Científicas · Editorial CSIC · Catarata

© Gonzalo M. Rodríguez Ruiz, 2023
© CSIC, 2023
http://editorial.csic.es
publ@csic.es
© Los Libros de la Catarata, 2023
Fuencarral, 70
28004 Madrid
Tel. 91 532 20 77
www.catarata.org

ISBN (CSIC): 978-84-00-11189-2
ISBN electrónico (CSIC): 978-84-00-11190-8
ISBN (Catarata): 978-84-1352-817-5
ISBN electrónico (Catarata): 978-84-1352-818-2
NIPO: 833-23-115-6
NIPO electrónico: 833-23-116-1
Depósito legal: M-29.808-2023
Thema: PDZ/PSVP

Impreso por Artes Gráficas COYVE

Reservados todos los derechos por la legislación en materia de Propiedad Intelectual. Ni la totalidad ni parte de este libro, incluido el diseño de la cubierta, puede reproducirse, almacenarse o transmitirse en manera alguna por medio ya sea electrónico, químico, óptico, informático, de grabación o de fotocopia, sin permiso previo por escrito del Consejo Superior de Investigaciones Científicas y Los Libros de la Catarata. Las noticias, los asertos y las opiniones contenidos en esta obra son de la exclusiva responsabilidad del autor o autores. El Consejo Superior de Investigaciones Científicas y Los Libros de la Catarata, por su parte, solo se hacen responsables del interés científico de sus publicaciones.

A mis padres y a Álvaro.
A Salomé.

Índice

INTRODUCCIÓN. Qué se entiende por comunicación animal y qué es 11

CAPÍTULO 1. ¿Recibir o percibir? 21

CAPÍTULO 2. ¿Emitir o señalizar? 33

CAPÍTULO 3. ¿De qué hablamos cuando hablamos de comunicación animal? 45

CAPÍTULO 4. Los mimbres de la evolución 50

CAPÍTULO 5. Cuestión de economía 67

CAPÍTULO 6. Señales del más acá 83

CAPÍTULO 7. Las máquinas de la verdad 97

CAPÍTULO 8. ¿Por qué lo llaman comunicación cuando quieren decir sexo? 108

CAPÍTULO 9. El caso de los ornamentos en las hembras 123

BIBLIOGRAFÍA 133

INTRODUCCIÓN

Qué se entiende por comunicación animal y qué es

¿Por qué los animales hacen las cosas que hacen? Esta es la gran pregunta a la que nos enfrentamos los ecólogos del comportamiento pero que, por desgracia, parece no tener una única respuesta sencilla y simple. Para cada animal y conducta concreta, tendremos un sinfín de cuestiones por responder. Darwin nos puso sobre la pista de cuáles son los principales factores que determinan los rasgos de un ser vivo: la supervivencia y la reproducción. Los animales son como son y hacen lo que hacen porque, entre otras cosas, sus antepasados consiguieron sobrevivir hasta reproducirse, precisamente, porque eran así y hacían lo que hacían. Estos dos elementos, la supervivencia y la reproducción, son los principales elementos sobre los que va a pivotar nuestro relato.

Para poder entender bien los procesos que hay detrás de la comunicación animal no basta con describir los comportamientos asociados, sino que debemos ir un paso más allá y plantear de forma profunda las causas que subyacen a cada uno de ellos. Para responder completamente a la pregunta de por qué un animal hace lo que hace, el zoólogo Niko Tinbergen, probablemente el primero que se puso a pensar sobre esto en profundidad, planteó que para responder adecuadamente a esta cuestión necesitamos dar cuatro tipos de

respuestas distintas. Veámoslas poco a poco utilizando un ejemplo: ¿por qué croan las ranas?

En primer lugar, porque existe una maquinaria que funciona de una manera determinada: el sonido que se produce al vibrar la laringe, la amplificación del sonido por el saco vocal (esa bolsa que se hincha como un globo). Para responder esta pregunta estudiaríamos las características morfológicas, físicas y fisiológicas que producen el canto (características del saco, diferencias en volumen del sonido, frecuencia sonora, complejidad del canto…).

También, porque existe un desarrollo del comportamiento durante la vida del animal, por su genética o su aprendizaje: las ranas están programadas genéticamente para croar en primavera, pero solo cuando han llegado a la fase adulta y ya no son renacuajos. Para responder a esta pregunta estudiaríamos el cambio del comportamiento a lo largo de la vida de los animales y podríamos recurrir a la embriología, a la genética…

En tercer lugar, porque el comportamiento del "croar" ya existía en los ancestros de las ranas actuales: la comunicación sonora apareció en el linaje de los anfibios anuros (los que no tienen cola como sapos y ranas), mientras que está ausente en los anfibios urodelos (que tienen cola como tritones y salamandras). Para poder responder a esta pregunta trataríamos de ver en qué momento de la historia surgió este comportamiento y deberíamos observar no solo el grupo de animales que nos interesa, sino también las ramas evolutivas, cercanas y no tan cercanas, de animales relacionados.

Por último, porque el comportamiento es adaptativo y contribuye a la supervivencia y el éxito reproductivo individual del animal: no es casualidad que el croar se llame "canto nupcial". Precisamente esta conducta atrae a las hembras para aparearse con ellas y, además y a la vez, repele a otros machos competidores. Aquí tendremos que estudiar las diferencias de comportamiento entre individuos, su relación con el éxito reproductivo y la supervivencia, con las dinámicas sociales entre los machos y las hembras…

A menudo, todos estos enfoques se entrecruzan y sus líneas son relativamente difusas, pero nos permiten abordar la cuestión de la manera más completa posible. Tinbergen planteó las preguntas en el campo del estudio general del comportamiento, nosotros lo aplicamos a la comunicación, pero en realidad se podrían aplicar a cualquier rasgo que percibamos en cualquier organismo vivo.

Desde Darwin, no podemos mirar la biología sin tener un ojo en el presente y otro en el pasado. Plantearnos qué es lo que sucede actualmente (las causas próximas) y por qué comenzó a suceder en su día (las causas últimas). La comunicación animal, como suele considerarse un tipo de comportamiento, tradicionalmente se ha encuadrado dentro del campo de la etología o, como la llamamos hoy en día, la "ecología del comportamiento". En realidad, la comunicación animal es toda una plétora de eventos y de aspectos relacionados con la forma de vida de los animales, con cómo se relacionan con el ambiente y con su propia historia evolutiva. Por eso, su estudio implica a menudo observar movimientos, gestos, sonidos…, pero otras veces implica medir rasgos como el tamaño de ciertas plumas, la superficie de una mancha de melanina o la proporción de un compuesto químico concreto. Medir rasgos que, *a priori*, no parecen relacionados con las interacciones comunicativas.

Es necesario abrir la mente y plantearse que algunos caracteres que parecen no tener importancia podrían ser la clave de la interacción social que observamos. No tiene sentido, y menos al hablar de comunicación, el considerar al animal aislado, sino que debemos analizarlo integrado en su entorno ambiental, atendiendo a todas las interacciones ecológicas y a su influencia en la eficacia biológica. Por todo ello, en nuestro relato tendremos que recurrir a conceptos de la biología evolutiva como la teoría de juegos, la selección sexual, el conflicto paternofilial, las estrategias evolutivamente estables, etc., y visitaremos a grandes científicos que deberían reivindicarse más a menudo como John Maynard-Smith, Amotz Zahavi, Mary Jane West-Eberhard, William Hamilton, Marian

S. Dawkins, Tom Guilford, Robert L. Trivers, Edward O. Wilson, Marlene Zuk, Alan Grafen, John Krebs…

El lenguaje humano y la comunicación en animales no humanos

Es inevitable, cuando hablamos de comunicación, hacernos preguntas sobre el lenguaje humano y si existen paralelismos con la forma de comunicación de los animales no humanos. Generalmente, se concibe el lenguaje humano como una facultad exclusiva de nuestra especie e, incluso, como un rasgo de la esencia humana. Sin embargo, numerosos estudios actuales comienzan a poner en duda si es una facultad tan exclusiva como creíamos o está también presente en otros animales. Para poder definir la facultad del lenguaje humano, el lingüista Charles Hockett, en los años sesenta, enumeró y describió las características de diseño del lenguaje. Llegó a enunciar hasta 16 características que, lógicamente, estaban sesgadas hacia un lenguaje hablado y escrito, muy distinto de cualquier sistema de comunicación animal (tabla 1).

Tabla 1

Principales características de diseño del lenguaje que se conciben actualmente, incluyendo las propuestas por Hockett.

CARACTERÍSTICA DE DISEÑO	DESCRIPCIÓN
Uso del canal vocal-auditivo	En el caso del lenguaje hablado
Transmisión de difusión	El mensaje se comunica en todas direcciones
Recepción direccional	Se puede percibir de qué lugar procede el mensaje
Desvanecimiento rápido	Los mensajes duran un breve periodo de tiempo
Intercambiabilidad	Cualquier hablante puede reproducir cualquier mensaje
Retroalimentación total	Los hablantes pueden escuchar, ser conscientes de su propio discurso y modificarlo
Especialización	La función de las señales en el lenguaje es únicamente la comunicación, no tienen otra función biológica
Semántica	Las señales tienen significado

CARACTERÍSTICA DE DISEÑO	DESCRIPCIÓN
Arbitrariedad	Las señales se componen de símbolos arbitrarios, como las letras o los sonidos
Elementos discretos	Las señales del lenguaje se pueden dividir en pequeñas unidades (letras, sílabas, palabras) que pueden combinarse entre sí
Desplazamiento	Capacidad de hablar de cosas remotas en el espacio y en el tiempo
Productividad	Capacidad para decir cosas que no han sido nunca dichas u oídas, generar y comprender nuevas expresiones o patrones gramaticales
Transmisión cultural	Aunque hay capacidad innata para el lenguaje, la lengua se aprende por medio del entorno social
Dualidad de patrones	Las palabras están compuestas por pequeñas variaciones en un conjunto relativamente pequeño de sonidos distinguibles que, en sí mismos, no tienen significado
Sintaxis	Combinar varias unidades portadoras de significado
Memoria	Capacidad de memorizar palabras y reglas de combinación
Imagen mental	Capacidad de recuperar imágenes visuales de objetos externos
Prevaricación	Capacidad de emitir mensajes falsos o tergiversar lo que dice
Capacidad de reflexión	Uso del lenguaje para reflexionar sobre el lenguaje mismo
Capacidad de aprendizaje	El lenguaje se puede enseñar y aprender
Discriminación	Capacidad de distinguir entre dos señales diferentes
Recursividad	Capacidad de reiterar muchos elementos para dar lugar a múltiples enunciados
Intercambiabilidad	De los roles entre emisor y receptor durante un proceso comunicativo

Esas características delimitaron de alguna forma los límites del lenguaje humano y, de manera subsidiaria, restringieron la posible existencia de un lenguaje animal al criterio del cumplimiento de todas las características. Algunas de ellas son inherentes a cualquier sistema comunicativo, como las que describen la utilización de canales de transmisión y el modo de difusión y recepción, pero otras que no parecen tan comunes también se dan en la naturaleza. Por ejemplo, el mono vervet (*Chlorocebus pygerythrus*) de Kenia cuenta con señales de alerta específicas para serpientes, leopardos y

águilas, lo que nos indicaría que su sistema de comunicación dispone de la característica de la semántica.

También se ha descrito la existencia de discriminación de señales de otras especies en el tritón común (*Lissotriton vulgaris*), que es capaz de distinguir entre los sonidos del sapo común (*Bufo spinosus*) y el sapo verde (*Bufotes viridis*), y elegir preferentemente las charcas habitadas por el primero. Aquí solo hemos mencionado dos ejemplos, pero es algo bastante común. Lo complicado es poder encontrar un sistema de comunicación animal que cumpla todas y cada una de las características de nuestro lenguaje. Es especialmente difícil demostrar que los animales son conscientes de su propio discurso cuando comunican y puedan modificarlo; de hecho es difícil demostrar que exista algo equiparable a un discurso. O demostrar que son capaces de utilizar su sistema de comunicación para reflexionar sobre el propio sistema comunicativo, tal y como hacemos en este libro. Todo esto ha llevado a pensar que únicamente los humanos tenemos un lenguaje complejo y que estamos en la cúspide del desarrollo comunicativo.

Sin embargo, un enfoque reciente de la nueva disciplina llamada "lingüística animal", abanderada por el investigador japonés Toshitaka Suzuki, nos muestra una forma diferente de estudiar los lenguajes desde un punto de vista evolutivo: evitando la separación entre los sistemas de comunicación humano y de animales no humanos. Dicho de otra forma: considerándolos como un mismo sistema. Suzuki plantea que hay algunas características que compartimos con otras especies animales, otras que solo los humanos tienen, y aquí lo novedoso de su planteamiento, otras que son exclusivas de los animales no humanos. Sus estudios sobre el sistema comunicativo del carbonero japonés (*Parus minor*) muestran que poseen semántica (significados concretos para algunas vocalizaciones), sintaxis (orden específico de distintos trinos para que tengan significado) o imagen mental (reconocer objetos concretos tras escuchar una vocalización con ese significado). Pero también que hay alguna característica que no parece existir en nuestro lenguaje, como la capacidad innata de discriminación entre señales complejas.

Mientras que nosotros no somos capaces de distinguir palabras ni reconocer su significado hasta que las aprendemos, los pollos de esta pequeña ave insectívora carbonero nada más salir del huevo responden de forma muy diferente ante una llamada de alarma general emitida por los padres, quedándose quietos y en silencio, o ante una llamada de alarma específica para serpientes, produciéndose una huida en masa del nido. No solo es sorprendente que los pollos distingan entre dos llamadas, sino que de manera innata sepan el significado de cada una y respondan de la mejor manera ante cada alerta: tratando de pasar desapercibidos ante un aviso generalista de depredador o huyendo rápidamente cuando el depredador es una serpiente que puede subir por el tronco y entrar en el nido. La ventaja adaptativa para la supervivencia que supone distinguir, reconocer y responder a estas señales está clara.

Personalmente, no me parece descabellada la idea de que los animales posean características comunicativas de las que nosotros carecemos. La lingüística animal de Suzuki aporta una perspectiva innovadora que pone el foco en las ventajas adaptativas del lenguaje humano en lugar de en sus singularidades. El paradigma mayoritariamente aceptado hasta ahora, y defendido por autores evolucionistas como Noam Chomsky y Stephen Jay Gould, no concibe que el lenguaje sea una adaptación evolutiva producto de la selección natural, sino como una consecuencia indirecta de las modificaciones cerebrales que la selección habría podido generar. Sin embargo, aunque pueda parecer inconcebible que nuestro lenguaje sea el resultado de la acumulación en el tiempo de adaptaciones evolutivas, autores como Steven Pinker defienden que esta podría ser una explicación más parsimoniosa y en la que no parece existir problema alguno cuando se utiliza para explicar el origen de otros rasgos como, por ejemplo, los ojos.

A pesar de todo, es lógico que existan ciertos reparos en considerar la selección natural como el único motor que ha provocado algo tan complejo como el lenguaje humano.Y es que llegar a obtener evidencias científicas sobre su origen es extremadamente complejo, aunque es posible. Por ejemplo, la

investigadora Mercedes Conde-Valverde, del equipo de Ignacio Martínez y Juan Luis Arsuaga, ha modelado los sistemas auditivos de los fósiles de humanos antepasados de los neandertales encontrados en la Sima de los Huesos en la sierra de Atapuerca para ver si nuestros ancestros podrían comunicarse por medio del habla. Sus investigaciones concluyen que, mientras los neandertales y los sapiens tenían una audición bastante similar, los humanos de la sima tenían una capacidad auditiva menor a frecuencias más altas. Piensan que la ampliación de la capacidad auditiva y la similitud entre neandertales y sapiens podría deberse a un proceso de convergencia adaptativa hacia una comunicación más eficaz, aunque, como ellos mismos reconocen, el estudio de los fósiles no nos indica si estos humanos ancestrales tenían capacidad de hablar, sino que nos habla de la posibilidad física de escucharse.

Sirva esta mención a la implicación de las adaptaciones evolutivas en la comunicación para aclarar que, sin olvidar otros planteamientos evolutivos también válidos y que serán contemplados, el enfoque de este libro es principalmente adaptacionista y, por tanto, las explicaciones que se proponen siguen las bases de la evolución por selección natural propuesta por Darwin. Recomiendo la lectura del capítulo 4 al quien quiera profundizar más sobre estos aspectos.

Permítame ahora que presente los contenidos del libro. Se ha organizado en cuatro bloques temáticos. En los tres primeros capítulos se habla del proceso de comunicación y se explica que para poder comunicar es necesario tener la capacidad de percibir, es decir, contar con las estructuras y órganos sensoriales necesarios para que un estímulo sea recibido (capítulo 1). Se expone que los órganos sensoriales están adaptados a la percepción de estímulos en función del canal en el que se emitan (aire, agua, suelo…) y cómo los animales procesan dichos estímulos. Para que exista comunicación tiene que haber un emisor que emita un mensaje en forma de señal; se verá entonces qué aspectos son los que determinan la señalización y cómo el ambiente puede influir en la emisión

del mensaje (capítulo 2). Tras esto, pueden distinguirse bien los procesos que son realmente comunicativos de los que no para así captar por qué los posibles conflictos de intereses entre emisor y receptor pueden ser uno de los motores que estén guiando el proceso comunicativo (capítulo 3).

Los dos capítulos siguientes se centran en poner las bases definitivas para poder entender bien el resto del libro: primero conociendo cómo la variabilidad y la selección son los motores de la evolución que moldea los procesos comunicativos (capítulo 4) y hablando después de algo que puede sorprender en un libro como este: la economía (capítulo 5), porque pocas cosas se entienden en este campo si no recurrimos a ella.

En el siguiente bloque de capítulos se trata el origen evolutivo de la comunicación. Se describen las propuestas acerca del origen de las señales comunicativas y se repasan algunos de los principales debates acerca de si las señales animales transmiten o no información (capítulo 6) y de los mecanismos evolutivos que indican si una señal es o no verdadera (capítulo 7). Al final de esta parte se expone cómo la batalla entre sexos ha sido, desde los tiempos de Darwin, uno de los grandes argumentos para explicar por qué existen señales tan ostentosas y, aparentemente, inútiles para la supervivencia pero extremadamente útiles para la reproducción como las plumas de la cola de un pavo real (capítulo 8).

El último capítulo del libro se centra en una cuestión que, hasta el momento, ha sido muy poco estudiada y que tiene un futuro prometedor: los ornamentos en las hembras (capítulo 9).

Aunque el orden de este volumen está concebido para que los contenidos se puedan entender sin problema si se lee de principio a fin, me atrevo a emular a Julio Cortázar en *Rayuela* y a plantear una guía de lectura alternativa. A aquel lector o lectora que no esté familiarizado con la teoría de la evolución de Darwin le sugiero que siga el siguiente orden: cuatro, cinco, uno, dos, tres, seis, siete, ocho y nueve. A aquel que conozca más o menos el contexto teórico evolutivo de la ecología del comportamiento animal le invito a que se deje guiar por su propia curiosidad y que comience el libro por el capítulo que desee.

Mi ambición con este libro es tratar de aportar una visión global del marco conceptual actual de la comunicación animal que pueda servir para entender todas las situaciones comunicativas de los animales no humanos. Sirva de advertencia al lector y lectora que los razonamientos que se encuentran en esta obra se enmarcan en el ámbito zoológico y que, en ningún caso, pretenden ser explicaciones de los ámbitos relacionales y comunicativos humanos. Aunque los animales humanos compartimos ancestros y sustrato evolutivo relacional con otras especies de animales no humanos, un volumen dedicado a explicar el funcionamiento y origen de la comunicación humana sería objeto de la antropología, la sociología o la psicología; campos a los que la zoología y la ecología podrían contribuir contextualizando a los humanos en la escala evolutiva. No obstante, aunque trataré de evitar abusar de conceptos antropocéntricos, en numerosas ocasiones emplearé ejemplos que parten de un marco de referencia humano o bien ejemplos hipotéticos para hacer más fácil la comprensión de las explicaciones. Por supuesto, también utilizaré otros de todo el reino animal que han sido escogidos por su utilidad didáctica.

Espero que disfruten de este viaje.

CAPÍTULO 1

¿Recibir o percibir?

Información del ambiente

Para poder llegar a reproducirse, primero hay que crecer y sobrevivir hasta el momento en el que sea posible hacerlo. Y esto implica interactuar con el ambiente, es decir, con el medio físico, con sus congéneres, con los depredadores…, de manera que se superen todas las dificultades que vayan surgiendo. Hay un elemento común a todas las interacciones con el ambiente, ya sea para comer, defenderse, huir, recorrer un camino, etc., el animal necesitará recopilar información, evaluarla y utilizarla. En este capítulo veremos que estar "bien informado" es importante para sobrevivir y que los animales, a su manera, también poseen un sentido crítico para considerar si la información recibida es veraz o no.

Empecemos por el principio: la información ecológica. ¿Qué es la información? Ríos de tinta han corrido para discutir esta cuestión y hablaremos de ello con detalle en el capítulo 6. Por el momento y, en el contexto que nos ocupa ahora, entenderemos que la información es aquello que potencialmente podría ser percibido por cualquier animal y, entonces, le daría a conocer la presencia o la existencia de algo: el color de un fruto, el sonido del agua corriendo, el olor de una flor… Pero también la huella de un animal, el sonido de un canto o

el olor de una presa; elementos, estos últimos, que podrían estar implicados en procesos comunicativos.

En el ambiente hay muchísima información disponible, aunque no es tan fácil recopilarla y disponer de ella. El primer aspecto por contemplar es la posibilidad de percibir esa información. Puesto que los animales no son entes aislados flotando en un espacio inerte y vacío, sino que están en contacto con su entorno más inmediato, de él es de donde extraerán la primera y más inmediata información. Por ejemplo, el contacto de su cuerpo con el medio que les rodea ya sea agua, aire, tierra o una combinación de ellos, es ya en sí misma una fuente de información. Sin embargo, como ya apuntaba Aristóteles: "Nada hay en el entendimiento que antes no haya estado en los sentidos"; esto es, la única manera en que el animal puede comunicarse con el mundo exterior y obtener información de él es a través de los órganos sensoriales.

Del estudio del funcionamiento de estos órganos y de la manera en que se reciben los estímulos ambientales y se procesan se ocupa la ecología sensorial, una parte de la ecología que, en conjunción con la física, la endocrinología, la neurociencia, la biología molecular y, por supuesto, el estudio del comportamiento animal, trata de comprender la evolución de los sistemas sensoriales.

La percepción de la información (de los estímulos informativos)

La información disponible en el ambiente como los cambios en temperatura, el sonido, la iluminación, los olores, etc., solo será relevante para el animal si este tiene la capacidad de percibirla en forma de estímulos, que registrará e interpretará con su sistema nervioso para responder de forma adecuada a ellos. El estímulo y la respuesta son dos términos que van ligados, puesto que la existencia de algún tipo de reacción, ya sea conductual, fisiológica, motora, etc., tras una percepción sensorial, es condición *sine qua non* para que esta sea considerada un estímulo

verdadero. Como veremos a continuación, el proceso desde que un estímulo es potencialmente perceptible hasta que la respuesta se produce es complejo y cada etapa tiene distintas restricciones que debemos tener en cuenta.

Se suele decir que cada órgano sensorial está adaptado al medio a través del cual es transmitido cada estímulo, pero, en realidad, la adaptación permite la detección de un tipo específico de energía (o de cambio en energía). Al medio a través del cual se transmite esa energía lo llamamos "canal de transmisión". Generalmente, hablamos de cinco canales: acústico, químico, visual, táctil y magnético, pero, dependiendo de los autores, también algunos contemplan un canal mecánico, un canal aéreo, un canal térmico o, incluso, un canal eléctrico.

Hay, sin embargo, unas características comunes a todos los receptores, independientemente del canal en el que operen. El funcionamiento general básico se compone de 1) una estructura receptora, que es una célula (o un conjunto de células) que está adaptada específicamente para detectar el estímulo concreto; 2) unas estructuras acompañantes cuya función es filtrar o ayudar a que el estímulo sea transmitido al sistema nervioso, 3) un nervio que conduce la información, en forma de impulso electroquímico, al sistema nervioso central, y 4) un cerebro que interpreta los impulsos y los convierte en imágenes, sonidos, olores…

Sobre este esquema general se producen miles de variaciones según cada especie. Y si vamos a estudiar un sistema comunicativo concreto, podría ser mucho más apropiado definir en cada caso qué es lo que cada órgano o sensor detecta (sustancias químicas, ondas electromagnéticas, cambios de presión, energía mecánica, magnetismo…), cómo lo hace y qué particularidades restringen o permiten la detección. Todo sin olvidar que ni los ojos ven ni los oídos oyen ni las narices huelen, sino que es el cerebro quien lo hace valiéndose de estos sensores. De hecho, el que sea el cerebro el que interpreta los estímulos eléctricos y no los órganos sensoriales ha inspirado algunas fantasías como la de la película *Matrix*, en la que los humanos viven conectados a un sistema electrónico

que estimula su sistema nervioso para generar sensaciones de percepción de un mundo real cuando, en realidad, están viviendo una simulación. Y aunque la posibilidad de que estemos viviendo una simulación por ordenador es una hipótesis que algunos científicos ven plausible, regresemos al mundo de las certezas y veamos a continuación cómo se produce la detección de los principales estímulos implicados en comunicación animal.

Detección acústica

Los sensores de sonido, como nuestro oído, lo que detectan son cambios de presión ínfimos que se producen en el aire por ondas mecánicas. Es decir, cuando un sonido se produce desde un foco emisor, como puede ser un altavoz, se emite energía mecánica en todas direcciones que hace vibrar las partículas del aire que hay alrededor, haciendo que se junten y se separen de forma cíclica, a medida que la onda pasa a través de ellas (figura 1). Esa aproximación y separación de las partículas del medio (que puede ser aire, agua o un medio sólido) produce los cambios de presión que es lo que detectan los sensores acústicos, como nuestro tímpano. De hecho, este se parece bastante a la membrana de un tambor que vibra cuando se la golpea, salvo que, en vez de golpear una baqueta, lo hace la onda sonora.

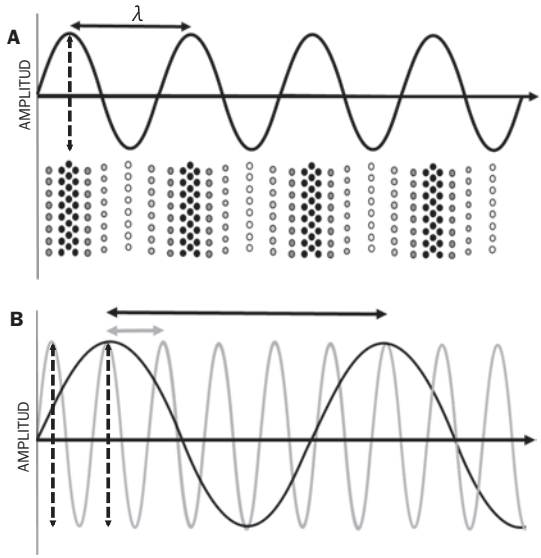
La vibración viene determinada por dos características de las ondas, la vertical, llamada amplitud, y la horizontal, llamada frecuencia. La amplitud es a lo que normalmente nos referimos como el volumen del sonido, aunque, en realidad, es la intensidad de las ondas de presión. Se mide en decibelios (dB) y cuanto más "alto" escuchamos un sonido, mayor amplitud tiene. La frecuencia, por otro lado, es el número de repeticiones de la onda por unidad de tiempo; se mide en hercios (Hz) y se relaciona inversamente con otra magnitud llamada longitud de onda, que es la distancia entre dos puntos en los cuales la onda se repite, como dos crestas o dos valles consecutivos. Que la frecuencia y la longitud de onda estén inversamente relacionadas quiere decir que cuanto

mayor es una, menor es la otra. Un sonido agudo, como por ejemplo un silbido, tiene una frecuencia alta (y longitud de onda pequeña), mientras que un sonido grave, como el de un bombo al ser golpeado, tiene una frecuencia baja (y la longitud de onda grande).

El rango de frecuencias que puede captar el oído humano es de entre 15 (algunos autores llevan el límite hasta los 20) y 20 000 Hz. Por debajo de esos límites hablamos de infrasonidos y por encima, de ultrasonidos. Otras especies son capaces de percibir sonidos en un rango muy distinto y muchísimo más amplio como los elefantes (*Loxodonta sp.*) (17-10 500 Hz), el caballo (*Equus caballus*) (55-33 500 Hz), el ratón doméstico (*Mus musculus*) (2.300-92 000 Hz) o invertebrados como la polilla lagarta peluda (*Lymantria dispar*) (5-150 000 Hz).

Figura 1

A) Correspondencia entre las crestas de la onda sonora y la compresión de las partículas del medio. B) Diferencia de longitud de onda entre sonidos agudos (onda gris) y graves (onda negra) para dos ondas de amplitud similar (flechas con línea discontinua).



La detección, en general, se hace primero por medio de unas estructuras que recogen el sonido (pabellones, discos auditivos, antenas…) y las vibraciones son detectadas por los tímpanos. Tanto unas como otros pueden tener diversas formas. En los vertebrados, es común la existencia de una membrana que vibra y transmite esa vibración a un sistema de cavidades en las que hay unos *pelos* sensibles que convierten la vibración en un impulso nervioso. Sin embargo, en el caso de los insectos, los sistemas auditivos son muy diversos y pueden estar localizados en diferentes lugares. Por poner tres ejemplos, pueden localizarse en las antenas (mosquitos y moscas de la fruta), en las patas (algunos grillos) o en el abdomen (algunas polillas). En el caso de las antenas de los mosquitos, es la propia estructura antenal la que vibra y transmite la vibración; en el caso de las patas de los grillos, el sonido entra por las tráqueas (los orificios por los que respiran los artrópodos y que están situados por todo el cuerpo) y hace vibrar una placa timpánica que transmite esta vibración a unas células detectoras; por su parte, en el abdomen de las polillas, el tímpano está conectado directamente con células receptoras que convierten la vibración en un impulso eléctrico.

Detección lumínica

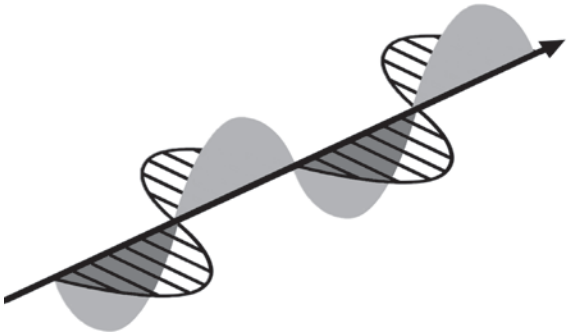
Desde su forma más simple de células fotosensibles hasta en los sistemas de ojos más complejos, los sensores implicados en la visión detectan luz visible (otra cosa es que esa luz sea visible por nosotros). Se trata de un cierto tipo de radiación electromagnética que se propaga en forma de onda y tiene dos componentes, uno eléctrico y uno magnético, que avanzan en la misma dirección, pero en planos perpendiculares (figura 2). Las dos diferencias fundamentales con las ondas acústicas son que las ondas electromagnéticas pueden propagarse en el vacío y que se comportan como un flujo de partículas sin masa llamadas fotones; algo así como bolitas de luz que recorren la onda.

Las ondas electromagnéticas se pueden clasificar en función de sus longitudes de onda. Su rango es muy amplio y va

desde las ondas de radio, con longitudes de onda de decenas de kilómetros, hasta los rayos gamma, que tienen longitudes de onda más pequeñas que una millonésima parte de un nanómetro. Dentro de todo este rango, la parte en la que es posible la visión es el rango de longitudes de onda entre 300 y 800 nm. En el centro, estarían las longitudes de onda correspondientes con todos los colores que vemos cuando aparece el arcoíris: violeta, azul, añil, verde, amarillo, naranja y rojo. En los humanos, el límite inferior está en la zona del violeta, en 380 nm, por debajo del cual está el ultravioleta, y el límite superior está en el rojo, en 750 nm, por encima del cual está el infrarrojo. Ni el ultravioleta ni el infrarrojo son visibles para nosotros, pero son detectables por muchos animales. La percepción se produce cuando los fotones inciden sobre las zonas donde se encuentran los receptores.

Figura 2

Onda electromagnética con los componentes eléctrico y magnético en campos perpendiculares.



Las células fotorreceptoras, que se agrupan en los ojos en lugares conocidos como retinas, contienen unas moléculas llamadas pigmentos visuales que, cuando reciben fotones de luz, absorben la energía que contienen y los traducen en un impulso eléctrico por medio de una reacción química. Cada ojo puede tener distintas estructuras y lentes que le permitirán tener mejor enfoque, mayor ajuste a las condiciones de

luz, etc., pero la transformación de la luz a visión dependerá del tipo y del número de células fotorreceptoras.

Los humanos tenemos dos tipos de células: los bastones, que son responsables de la visión cuando hay poca luz, y los conos, que se ocupan de la visión en color. El color percibido se debe a la longitud de onda de la luz reflejada por los objetos cuando son iluminados. Dependiendo del tipo de pigmentos visuales en cada cono, se percibirá una u otra longitud de onda. Y en función del número de tipos de conos distintos que un animal posea, tendrá visión monocromática (un tipo de cono), dicromática (dos tipos de cono), ya así hasta pentacromática (cinco tipos de cono). La visión tetracromática parece ser la condición ancestral en los vertebrados, aunque muchos la han perdido. Por ejemplo, los humanos somos tricromáticos: tenemos conos para el rojo, el verde y el azul; por eso en algunos programas de edición fotográfica se usan los parámetros RGB (del inglés *red*, *green*, *blue*).

Detección química

Se encuentra en todos los organismos, incluidas las bacterias, y probablemente sea la capacidad sensorial que primero apareció en la historia evolutiva y que estuvo implicada en procesos comunicativos. Se trata, precisamente, de la detección de sustancias químicas concretas que estarán integradas o disueltas en el medio, ya sea el aire o el agua. Cada sustancia química se unirá a un receptor específico, es decir, una proteína que se encuentra en la membrana celular de las células quimiorreceptoras. Aunque dentro de la detección química también entraría el caso del gusto (detección de sustancias químicas al comer), solo vamos a ocuparnos del caso de detección a distancia, como el olfato y sistemas homólogos.

En general, el sistema de detección olfativa en animales se compone de una cámara que encierra las células quimiorreceptoras y que está abierta al exterior por un agujero de algún tipo (orificios nasales, narinas, poros, etc.) que

permite que el medio del que está rodeado, aire o agua, penetre en la cavidad llevando las sustancias a detectar. Dentro de la cavidad, las células quimiorreceptoras pueden estar de forma individual, como en los sensilios de los insectos, o agrupadas formando epitelios olfativos que a su vez se organizan en órganos como el bulbo olfativo o el órgano vomeronasal en los vertebrados. Estas células son verdaderas neuronas que están protegidas por algún tipo de fluido (mucus, linfa). En uno de los extremos de las neuronas quimiorreceptoras están las proteínas a las que se unen estas sustancias y en el otro las dendritas que se comunican con el sistema nervioso.

Las características de los sistemas sensoriales

Dentro de cada especie hay variaciones sobre cada órgano, sus propiedades, su posición…, que están adaptadas para percibir cada estímulo en cada medio. Tanto las características de los órganos sensoriales como las del medio van a condicionar el tipo de estímulos que va a poder percibir el animal. Los sistemas sensoriales tienen unas propiedades comunes que nos permiten entender mejor cómo funcionan y lo que implica para la comunicación animal.

Rango de sensibilidad específico

Los sistemas sensoriales no son sensibles a todos los estímulos que pueden percibirse en cada medio (ondas sonoras en el acústico, ondas electromagnéticas en el visual y sustancias químicas en el olfativo), sino que el rango de estímulos que puede detectarse es muy concreto y depende de las propias adaptaciones de los animales. Por ejemplo, los estímulos visuales que puede recibir un animal nocturno son muy distintos de los que puede recibir uno diurno, o los que tiene un animal acuático de los que tiene uno terrestre. Las sensibilidades de los sistemas sensoriales y el rango de detección

tienden a encajar con los ambientes, los hábitats y los estilos de vida de cada animal.

- *Habituación:* los sensores se acostumbran a recibir un estímulo con el tiempo si este no deja de percibirse. Es como cuando entramos en una habitación y hay un ruido constante, por ejemplo, del aire acondicionado o de un ordenador encendido, y al principio lo percibimos como muy presente, pero con el tiempo dejamos de darnos cuenta de que ese sonido se está produciendo.
- *Intensidad:* los sensores son capaces de medir la magnitud con la que los estímulos llegan a los receptores. Sin embargo, la percepción de esta intensidad, en ocasiones, depende de si la magnitud de un estímulo es comparable con la de otro y del tamaño de esa diferencia. Esto viene determinado por la ley de Weber, que plantea que es necesaria una diferencia mínima de magnitud para que ese estímulo se aprecie como distinto. Es decir, que aunque la diferencia de intensidad sea similar, pongamos de 20 unidades, la diferencia se aprecia mejor cuando las cantidades a comparar son pequeñas, por ejemplo, entre 100 y 120, que cuando son grandes, por ejemplo entre 1000 y 1020.
- *Contraste:* puede que la detección de un estímulo concreto solo sea posible dependiendo del contraste que exista con estímulos que están de fondo en el mismo canal. Por ejemplo, una mancha negra en una camiseta verde claro se detectará mucho mejor que si la camiseta es gris oscuro; o encontramos más fácilmente a Wally en un dibujo sin apenas gente que en uno en el que aparece rodeado por una multitud.
- *Ruido:* puede parecer similar a la anterior, pero es distinta. En este caso, nos referimos a la posibilidad de detectar y distinguir un estímulo de un fondo que fluctúa y con el que el estímulo podría ser confundido. Por ejemplo, la voz de alguien que nos llama podría no llegar a escucharse si la calle está llena de gente paseando y hablando.

Estudiando las características de los sistemas sensoriales de cada especie podemos entender por qué viven como viven, cómo están adaptados a percibir información de su entorno y cómo la utilizan. Con estar adaptados no nos referimos a que los animales son muy flexibles en su comportamiento o capacidad sensorial y, entonces, pueden modular su detección para percibir mejor esto o aquello. Nos referimos a la adaptación como concepto evolutivo, a que las propias condiciones ambientales seleccionan aquellos individuos que son capaces de detectar los estímulos de la mejor manera y les confieren una ventaja adaptativa. Así pues, que los animales posean un sistema y un rango sensorial adecuado para desenvolverse en un ambiente específico, como por ejemplo la capacidad de los animales nocturnos para ver en la oscuridad, se debe a que en algún momento del pasado sus antepasados sobrevivieron y se reprodujeron más que sus vecinos, precisamente, porque sus capacidades sensoriales les permitieron hacerlo: los animales nocturnos de hoy son los tatara-tatara-tatara… nietos de otros animales que empezaron a ser capaces de ver de noche. Selección natural en estado puro.

Como avanzábamos al principio, la vida de los animales puede depender de que sean capaces de percibir los estímulos relacionados con la información de su ambiente. El procesamiento de la información no termina con la detección; de hecho, es solo el principio. Una vez que el estímulo informativo llega al receptor sensorial, este será descodificado en forma de impulso eléctrico y lo conducirá a través de las neuronas al sistema nervioso. En el sistema nervioso central, además de discriminar el tipo de estímulo, se interpretará y se extraerá la información que contiene. Pero puede que sea necesario utilizar algunas habilidades cognitivas innatas o aprendidas, como la memoria y la experiencia previa, que permitan al animal valorar la procedencia, la calidad y la veracidad de la información. Es necesario mencionar que todas las características del procesamiento de los estímulos ambientales también constituyen rasgos que han sido seleccionados por sus ventajas adaptativas y que las condiciones ambientales son

auténticas presiones de selección que actúan sobre la adquisición de información ambiental y los sistemas comunicativos.

En este capítulo hemos tratado de mostrar que la condición de ser perceptor de estímulos es un requisito necesario para establecer un proceso comunicativo. En el siguiente capítulo nos centraremos en el papel del emisor, aquel que inicia el proceso comunicativo.

CAPÍTULO 2

¿Emitir o señalizar?

Información social

De toda la información que hay disponible en el ambiente, solo la que es generada por otros animales, congéneres o no, es la que puede estar implicada en la comunicación animal. Basta que un animal perciba la presencia de otro individuo vecino, ya sea por haberlo visto, oído, olfateado…, para que esta información pueda constituir un estímulo que suscite una respuesta. A toda la información que es susceptible de ser captada por un animal y que provenga de otro, la llamaremos información social o información adquirida socialmente. Detengámonos a pensar un momento acerca de los tipos de información pública con un pequeño ejemplo:

Pensemos en un ave muy habitual en toda la península ibérica, un herrerillo (*Cyanistes caeruleus*), que al final del verano busca frutos de los que alimentarse entre los arbustos de un bosque. Si esta actividad la realiza en presencia de otros pájaros, se considerará que está liberando información social. Otros animales pueden observar a nuestro herrerillo comer de un arbusto en concreto y acercarse a comer allí también. Sin embargo, esto no quiere decir que el herrerillo les esté comunicando que ahí hay comida para todos. El herrerillo, en este caso, está liberando información social involuntaria, es

decir, no puede evitar que otros animales le vean comer. Otros ejemplos de información social involuntaria podrían ser las huellas que se dejan al pasar por un camino embarrado, los restos de comida en el suelo o las heces de un pájaro sobre el capó de un coche.

Una curiosidad: el concepto de *información social involuntaria* proviene del inglés, *inadvertent social information*, y, a menudo, se traduce erróneamente como 'información social inadvertida'. Sin embargo, en castellano, *inadvertido* significa que no ha sido observado, precisamente lo contrario de lo que se pretende reflejar con el término y, además, la traducción parece hacer referencia al animal observador, cuando el término original se refiere al individuo que genera la información. La información social involuntaria se detecta por los estímulos sociales como las huellas o los restos de comida, que son potencialmente informativos para un observador, pero que no están implicados en la comunicación. A estos los solemos llamar "indicios" y a los estímulos que están implicados en comunicación, los llamamos "señales".

Separar el grano de la paja: indicios frente a señales

¿Qué diferencia hay entre indicios y señales? ¿Cómo podemos distinguirlos? La diferencia fundamental recae en el proceso evolutivo. En el caso de las señales, la selección natural las ha modelado para que el emisor las envíe y el receptor las reciba; mientras que, en el caso de los indicios, son simplemente información que un animal hace accesible a su entorno de forma involuntaria, sin que la selección natural haya participado en ello.

¿Qué es una señal? Se han dado muchas definiciones, algunas de ellas aluden al contenido o significado de la señal, otras a la transferencia de información… y, como veremos en próximos capítulos, esos detalles, aparentemente pequeños, han sido objeto de algunas de las más intensas discusiones académicas en este campo. Sin embargo, para los propósitos

de este libro creo que es posible proponer una definición de consenso que, sin hablar de información o de contenido de la señal, vaya a lo esencial: "Una señal es un comportamiento o estructura de un animal emisor que cuando es detectado por otro animal receptor, suscita en este una respuesta conductual; habiendo evolucionado, tanto la emisión de la señal como la recepción y correspondiente respuesta, por selección natural para desarrollar esa función comunicativa". Veámosla poco a poco.

Una señal es un comportamiento o estructura de un animal emisor […] Hay algunos comportamientos que parecen más o menos claros en cuanto a que pueden ser constitutivos de una señal. Por ejemplo, los extravagantes cortejos de algunos machos de aves, como la avutarda (*Otis tarda*), que realizan la llamada rueda hinchando su cuello, retorciendo las alas y desplegando la cola para enseñar las plumas blancas. Sin embargo, las estructuras que muestran, como el color de las plumas o el tamaño del cuello podrían ser también constitutivos de señal, independientemente de si existe un comportamiento asociado para mostrarlas.

[…] *que cuando es detectado por otro animal receptor, suscita en este una respuesta conductual* […] en el caso de la avutarda, el comportamiento esperado en el receptor, la hembra, sería que se acercase para copular. No siempre tiene por qué responder la hembra (receptor) cuando recibe la señal del macho, pero, para que la rueda se considere una verdadera señal, debe ser habitual que se produzca una respuesta ante ese estímulo.

[…] *habiendo evolucionado, tanto la emisión de la señal como la recepción y correspondiente respuesta, por selección natural para desarrollar esa función comunicativa.* Es decir, los comportamientos o estructuras que se muestran y la respuesta a estas han sido producidas por la selección natural: en algún momento del tiempo evolutivo, los ancestros machos de las actuales avutardas comenzaron a comportarse de ese modo y a mostrar el cuello y las plumas, y los ancestros hembras empezaron a responder; de manera que aquellos individuos que

comenzaron a producir la señal (y a responder a ella), de alguna forma tuvieron ventaja sobre los que no lo hacían y pudieron transmitir sus genes a las siguientes generaciones con más eficiencia que los que no participaban en el proceso de cortejo. Y, además, sus descendientes también heredarán la capacidad de emitir o responder a ese cortejo.

Aunque la explicación que hemos ofrecido es un poco simple y bastante especulativa, nos sirve para explicar qué es una señal y cómo opera la selección natural en estos procesos. A lo largo del libro iremos profundizando en cómo es posible que se haya producido la evolución de las señales.

Señales en los distintos canales y restricciones ambientales

En 2022 se cumplieron 30 años desde que el biólogo evolutivo canadiense John Endler propuso el modelo del impulso sensorial (*sensory drive*) para explicar cómo el ambiente podría influir en los distintos aspectos de la comunicación. Según este modelo, los rasgos de emisor y receptor coevolucionan en función de las características del contexto en el que se manda el mensaje; esto es, de las particularidades de cada ambiente. Las condiciones de los medios abiótico (físico) y biótico (especies vecinas, posibilidades de alimentación, amenazas de depredación…) restringen las condiciones en que una señal puede ser transmitida y recibida. Tanto emisores como receptores "afinarían" sus sistemas de emisión (intensidad, frecuencia, brillo…) y recepción (sensibilidad) de señales de acuerdo con el ambiente (cantidad de ruido, contraste con el fondo…), consiguiendo, así, que la comunicación fuese exitosa. Por ejemplo, las aves que habitan cerca de entornos ruidosos, como los aeropuertos, adelantan la hora de comienzo de sus cantos para evitar el ruido ambiental causado por los aviones. La restricción ambiental, en este caso, está determinada por la hora en la que empiezan los aviones a despegar y a aterrizar y, por tanto, cuando aumenta muchísimo el nivel

de ruido ambiental. La estrategia de adelantar la hora de inicio del canto es un ejemplo de modulación de la emisión. Sin embargo, esta capacidad de afinación en la que los sistemas de emisión y recepción modulan sus capacidades dentro de lo posible en su función viene determinada, precisamente, por el propio ambiente, que impone unas restricciones concretas donde es posible emitir y recibir una señal. Es decir, la capacidad de modulación es un rasgo que también está sujeto a la selección natural. En el caso de la recepción, ya lo vimos en el capítulo 1, ha sido seleccionado el rango concreto de detección en el caso de la luz y el sonido, o las sustancias químicas detectables, en el caso de la detección química. En cuanto a la emisión, también existen unos parámetros específicos que, en la mayoría de los casos, encajan con los niveles de detección de los organismos receptores en las condiciones ambientales del medio en que las señales son emitidas. Pero eso no quiere decir que los parámetros se han ajustado porque los animales hayan elegido conscientemente la configuración de las señales para que coincidan con las del receptor. Imaginemos que hay una población de animales en la que hay unos emisores que emiten cada uno con una configuración, siendo estas: A, B, C, D…, Z. Y en la misma población, los receptores solo tienen la capacidad de recibir los estímulos configurados en D, E y F. ¿Qué individuos conseguirán que sean percibidas sus señales? Los que están configurados según D, E y F. Si resulta que, por haber enviado la señal y haberla recibido los receptores, esos individuos se benefician de la respuesta de los receptores, ellos serán seleccionados y el resto no.

Veamos a continuación cómo se produce la emisión de señales en los tres tipos más comunes de comunicación.

Emisión de señales visuales

Este tipo de comunicación implica, de manera general, dos tipos de señales: las determinadas por patrones de color y formas y las que implican la exhibición de un movimiento o postura concreta.

En el caso de los patrones de color, los colores normalmente se expresan en la piel, pelo o plumas de los animales porque emplean el reflejo de la luz que les incide. Hay dos tipos de coloración que emplean la luz reflejada: la coloración estructural y la coloración pigmentaria.

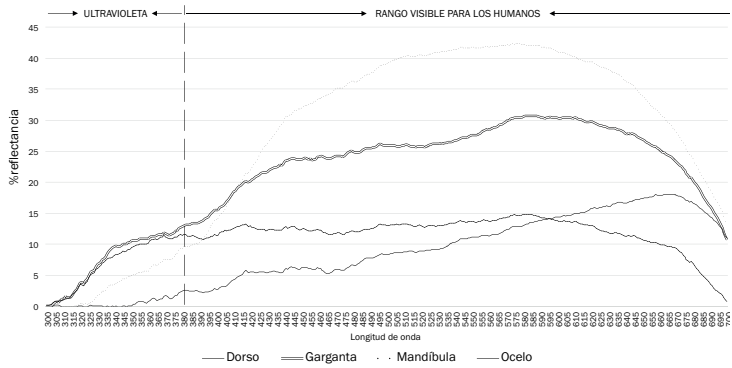
La coloración estructural se debe a la reflexión selectiva de la luz por estructuras microscópicas como fibras, escamas, pequeños cristales espejo o proteínas, que están insertas en el tegumento de los animales (piel, escamas, plumas, cutícula) y se combinan de tal forma que reflejan o dispersan la luz dando lugar a colores. El funcionamiento, aunque mucho más complejo, es algo similar a cuando vemos colores amarillos, rosados o azules reflejados en la superficie de una pompa de jabón; los colores que percibimos no están ahí porque el jabón sea coloreado, sino porque la propia forma de la pompa hace que la luz, al reflejarse, lo haga con colores concretos.

Por otro lado, están los pigmentos: moléculas que absorben una parte del espectro de luz y reflejan la otra parte. Para entender cómo funciona, recordemos que el espectro de luz visible es equivalente al arcoíris y que los colores que contiene son violeta, azul, añil, verde, amarillo, naranja y rojo. El reflejo, las longitudes de onda que no son absorbidas, es el que nos da el color que podría captar un receptor. Por ejemplo, un pigmento que absorba la zona del espectro entre el violeta y el amarillo, reflejará el color rojo, que es la parte del arcoíris que no es absorbido. O, si absorbe las longitudes de onda entre el azul y el violeta, reflejará la parte del arcoíris entre el verde y el rojo, y nosotros lo veremos de color amarillo. Hay muchas moléculas que pueden actuar como pigmentos, muchas de ellas están repartidas por todo el reino animal. Algunos ejemplos son los carotenoides, que reflejan el rojo, el amarillo y, en algunos casos, el azul; las porfirinas, que reflejan el verde o el rojo, o las melaninas, que reflejan el amarillo oscuro y el marrón. Algunos de estos pigmentos, como los carotenoides, solo pueden expresarse si se incorporan con la dieta, mientras que otros, como las melaninas o las porfirinas, se sintetizan dentro del cuerpo de cada animal.

Hay algunos pigmentos que son exclusivos de algunos grupos de aves. Es el caso de las psitacofulvinas, un tipo de pigmento exclusivo de la familia de aves *Psittacidae* que incluye a los loros, guacamayos y cotorras. Estos pigmentos reflejan los colores que van del amarillo al rojo y, también, pueden combinarse con colores estructurales y dar lugar al verde. Se desconocen las razones por las que esta familia, a diferencia de lo que sucede en el resto de aves, no utiliza los carotenoides en la coloración amarillo-roja. Se sintetizan en el folículo de las plumas y se cree que podrían haberse originado como un mecanismo para proteger las plumas de la degradación.

Figura 3

Curvas de reflectancia de distintos puntos del cuerpo de un macho de lagartija carpetana (*Iberolacerta cyreni*). El eje de las longitudes de onda nos muestra el espectro visible, estando los azules a la izquierda del eje y los rojos a la derecha. El porcentaje de reflectancia nos indica, numéricamente, la cantidad de cada color que podemos ver en cada parte del cuerpo del animal. Los humanos no vemos por debajo de 380 nm, donde se encuentra el ultravioleta, pero vemos que, salvo el dorso, las otras partes del cuerpo de la lagartija carpetana reflejan este color en una buena proporción.



Nosotros los humanos no somos capaces de ver en la zona ultravioleta del espectro, pero hay muchísimos animales que sí son capaces de percibir los reflejos de esta parte del espectro. Para detectarlo, nosotros debemos utilizar cámaras de fotos con un filtro especial, acoplado al objetivo, o utilizar un espectrofotómetro, que es un aparato que emite luz y detecta la curva de color que es reflejada (figura 3).

La coloración que hemos descrito hasta el momento se produce cuando parte de la luz se refleja. Sin embargo, hay otros tipos de coloración existente en algunos animales que no implica simplemente el reflejo de la luz, sino la emisión de esta. Son los fenómenos llamados de luminiscencia, en los que un tejido del organismo es capaz de recibir o almacenar energía y emitirla en forma de luz. En otros casos, como el de los escorpiones, no vemos luminiscencia sino fluorescencia. Cuando se ilumina su cuerpo, por ejemplo, con luz ultravioleta, su cuerpo reacciona también emitiendo luz, pero en una longitud de onda distinta de la luz que recibe, y lo vemos de color azul verdoso. Este efecto, aunque podría parecer que solo es propio de insectos o animales con caparazón o exoesqueleto, lo cierto es que aparece en muchos grupos animales, incluso en los vertebrados, como en el gecko de Namibia (*Pachydactylus rangei*), que parece que se convierte en un cartel publicitario de neón cuando es iluminado con luz ultravioleta; solo permanece mientras el animal es iluminado. Parecido, pero no igual, es el caso de la fosforescencia, en el que la energía lumínica se almacena y se va liberando poco a poco. Aunque este efecto nos resulta mucho más familiar porque es la propiedad que tienen muchas manecillas de reloj de pulsera, o algunos juguetes para niños que brillan en la oscuridad, parece ser un poco menos frecuente en la naturaleza. Sin embargo, hay ejemplos espectaculares, como el de la rana punteada (*Hypsiboas punctatus*) que libera la luz una vez ya ha pasado el crepúsculo e ilumina las noches de algunos bosques sudamericanos. En la naturaleza es más común el caso de la bioluminiscencia, en la que la fuente de energía que emite la luz es

química. Dentro del cuerpo de estos animales se produce una reacción química que oxida un compuesto llamado luciferina y que como resultado da energía para producir esa luz. No solo la encontramos en animales como las luciérnagas, los peces linterna o algunas medusas, sino que es también común en hongos y bacterias. De hecho, en el caso del pez linterna (*Centrophryne spinulosa*), la reacción de oxidación no la producen sus células, sino bacterias simbióticas que se alojan en el apéndice que cuelga de su cabeza: la linterna.

Cuando hablamos de comunicación visual también nos referimos a las exhibiciones de movimientos y posturas como las danzas de cortejo que realizan muchas aves o los saltos que dan las gacelas delante de sus depredadores. Estos comportamientos tienen una función comunicativa, y en ellos, además, suelen estar implicadas también las señales coloridas.

Emisión de señales acústicas

La emisión de sonidos precisa de un sistema que produzca vibraciones. Los más simples se basan en la producción de golpes, ya sea de una parte del cuerpo contra otra, como hacen las cigüeñas (*Ciconia ciconia*) cuando crotorean haciendo chocar las dos piezas de su pico entre sí, o haciendo chocar una parte del cuerpo contra un elemento externo, como los pájaros carpinteros cuando golpean los troncos de los árboles con sus picos. Otra manera común entre algunos insectos es frotar una parte del cuerpo contra otra; una conducta llamada estridulación y que, con toda seguridad, el lector habrá escuchado, como el canto de las cigarras y los grillos en las secas tardes de verano. Por último, mencionaremos el sistema de vocalización, es decir, hacer pasar el aire por un conducto, hacer vibrar una membrana y regular su salida a través de una serie de cavidades que modulan el sonido. Este sistema es el más común en los vertebrados que, aunque comparten un sistema respiratorio parecido,

presenta múltiples variaciones que han sido aprovechadas para la producción de sonido. Por ejemplo, en las aves los sacos aéreos están involucrados en el canto y estos animales no poseen cuerdas vocales como los mamíferos, sino que tienen un sistema complejo de válvulas situado en la tráquea llamado siringe.

Emisión de señales químicas

En la comunicación química, a los compuestos que están involucrados en la comunicación los llamamos semioquímicos. Estos compuestos son, básicamente, de tres tipos: las feromonas, en las que cada una es una sustancia química que produce una respuesta automática en el receptor cuando las detecta; los perfiles químicos, que son una mezcla de varios compuestos única y exclusiva de un emisor, y los aleloquímicos, que son compuestos que están implicados en comunicación con otras especies distintas de la del emisor. Aunque en algunos casos son subproductos de la excreción de los animales como heces u orina, la mayoría de estos compuestos se producen en glándulas especializadas. Estas suelen consistir en una agrupación de células que producen las sustancias químicas y las liberan al exterior a través de un poro. La diversidad de tipos de glándulas, su localización y función dentro de cada especie es abrumadora. Veamos algunos ejemplos: en las avispas, existen glándulas que producen compuestos químicos en la boca, en las patas o junto al aguijón. En las lagartijas se encuentran las glándulas femorales, situadas en la parte interior de las patas posteriores. En muchos mamíferos existen glándulas anales, en las mejillas y en el dorso (normalmente asociadas a los folículos de los pelos). En las aves existe la glándula uropigial, situada en la base de la cola. Los ejemplos son innumerables.

La emisión de estas señales químicas puede producirse por liberación de la secreción o de la marca (heces y orina) en el medio, tras lo cual el animal se aleja de la señal; como en el caso de los animales territoriales que dejan marcas en

distintos puntos de su dominio, o en el de las hormigas, que marcan el camino por el que pasan. Otra forma es que la señal sea portada por el animal y solo sea transmitida al receptor en el momento en el que se encuentran; como hacen los mamíferos o aves que se restriegan la secreción por su cuerpo y así se impregnan de olor.

Aunque pudiera parecer, por cómo lo hemos explicado, que la emisión de los distintos tipos de señales en cada modalidad sensorial (acústica, visual o química) se produce de manera separada, lo cierto es que sucede todo lo contrario. Es muy habitual que convivan señales visuales, acústicas y químicas a la vez y que todo el proceso comunicativo implique el uso simultáneo de dos o tres tipos de señales.

Multitasking comunicativo

Hablamos de señales múltiples cuando dos o más señales se expresan de forma simultánea y, si lo hacen en distintas modalidades sensoriales, hablamos de señales multimodales. Se han propuesto varias explicaciones acerca de por qué las señales conviven. Voy a utilizar al macho del ciervo ibérico (*Cervus elaphus hispanicus*), uno de los animales que más señales simultáneas y en distintas modalidades utiliza, para explicarlas. Las señales a las que nos vamos a referir son el berrido (acústica), las cuernas (visual), la mancha negra ventral (visual) y un curioso comportamiento en el que mueve de manera rítmica su pene para rociar su propia orina sobre su vientre (visual y química).

Una de las explicaciones dadas argumenta que las señales múltiples proporcionan información complementaria y múltiple al receptor: como las cuernas del ciervo que pueden estar proporcionando información sobre su capacidad de lucha y, a la vez, el tamaño de la mancha ventral estar informando sobre su rango en la jerarquía de dominancia. Otra explicación es que las señales múltiples facilitarían que el receptor evaluase la información más rápidamente, porque sirven para valorar si la información proporcionada es coherente. Por

ejemplo, el ciervo muestra el tamaño corporal por medio del berrido, y el tamaño de las cuernas y de la mancha ventral. Otra explicación más plantea que las señales coexisten para que, en función de las condiciones ambientales, el mensaje llegue igualmente. Por ejemplo, si hubiese niebla o los ciervos se encontrasen en la espesura de un bosque, el berrido sería una señal excelente, dado que la señal visual no funcionaría.

Pero no todas las conductas o rasgos que nos llamen la atención tienen por qué ser señales. En el próximo capítulo nos detendremos en esto y veremos el papel de la comunicación en las interacciones animales.

CAPÍTULO 3

¿De qué hablamos cuando hablamos de comunicación animal?

El núcleo de la vida social animal

Siempre que vemos que dos animales interactúan, la pregunta sobre si se está produciendo verdadera comunicación está en el aire. Existen muchos tipos de interacciones, pero se podría decir que, estrictamente, solo podemos hablar de comunicación cuando entran en juego un emisor, un receptor y una señal que ha evolucionado, explícitamente, para producir la respuesta del receptor. Hay interacciones que, aunque podría parecer que no implican un evidente envío y recepción de señales, podrían constituir una verdadera interacción comunicativa, como dos pájaros que comparten juntos un cable de la luz como posadero o dos gatos que se acuestan uno encima del otro. A menudo, este tipo de interacciones pueden llevar asociado el uso de señales químicas, visuales o sonoras que, a nosotros como observadores, nos pasan desapercibidas. En cualquier caso, e independientemente de lo evidentes que pueden sernos las señales empleadas, las interacciones son el núcleo de la vida social animal, tanto dentro de una misma especie como entre especies. Y el uso de señales parece que acaba ocurriendo porque así la comunicación se hace más eficiente. Algo parecido a lo que sucede cuando visitamos un país del que no conocemos el idioma y nuestra

comunicación es al principio muy ineficiente; pero, tras un tiempo allí, conseguiríamos aprender algunas palabras o mejorar el uso de nuestros signos. En la naturaleza no funciona de la misma manera, únicamente con el aprendizaje, sino que la selección natural es el verdadero motor que hace que algunas de esas interacciones se hayan articulado en un sistema que parece ser más eficiente.

¿Conflicto de interés o interés de conflicto?

Una visión hermosa, y ciertamente romántica, de la naturaleza como en un estado de equilibrio, de cooperación entre los individuos y especies, la existencia del altruismo, la ausencia de sufrimiento y dolor, etc., es algo que a veces aparece, más o menos explícitamente, en algunas ideas colectivas de cómo funciona el mundo natural. Nada más lejos de la realidad, hermosa también, pero en la que muchísimas situaciones son de conflicto y de lucha. Incluso cuando el encuentro o la interacción son pacíficos, una visión más a fondo del contexto ecológico nos revela que existen conflictos de interés. Algunos de ellos son muy claros y otros son más sutiles, pero todos surgen cuando los individuos, o sus genes, compiten por tener la mayor eficacia biológica: sobrevivir hasta reproducirse y, cuando lo hacen, ser quien mayor descendencia deja en la siguiente generación. Veamos los casos más comunes.

El conflicto entre especies

En este caso encontramos, de forma general, dos tipos de conflictos. El primero es el que se da en la red trófica entre depredador y presa. Los intereses son completamente opuestos, el depredador quiere comer para sobrevivir y tener más recursos para reproducirse y la presa solo quiere sobrevivir para, asimismo, reproducirse en un futuro. Aquí, la comunicación funciona para evitar al depredador o para atraer a la presa. Existen muchos casos de señalización antidepredadora, en los que la

presa trata de comunicar al depredador que no puede con ella; como los grandes saltos que realiza la gacela de Thomson (*Eudorcas thomsonii*) delante del depredador.

El segundo caso de conflicto entre especies es el que se da entre dos que no se depredan entre sí, pero luchan por ocupar un mismo nicho ecológico. Es decir, compiten por recursos similares como la dieta o el espacio. Quien más obtenga, más sobrevivirá y mayor descendencia tendrá. Las señales, en estos casos, suelen ser disuasorias, para tratar de expulsar al rival sin tener que llegar a una pelea. En algunas especies de lagartijas, por ejemplo, es muy común el gesto de levantar una de las patas delanteras y mover la mano lentamente haciendo una especie de círculo mientras se permanece totalmente quieto. Esta señal suelen hacerla delante de depredadores o de individuos de otra especie.

El conflicto entre sexos

La diferencia en la cantidad y el coste que supone producir los gametos de un macho, muchos y muy baratos, y los de la hembra, pocos y muy caros, hacen que surja un conflicto de interés muy fuerte entre ambos sexos. Mientras el macho usa una estrategia basada en conseguir el mayor número de cópulas posibles, la hembra, para asegurarse el tener descendencia, elige al mejor macho posible. La estrategia del macho se basa en la cantidad y la de la hembra en la calidad. Por eso, quien elige es la hembra y los machos compiten entre sí para conquistarla. Aunque es necesario aclarar que en algunas especies la diferencia en las estrategias no es tan extrema e, incluso, podría llegar a considerarse que han desaparecido o se han invertido los roles sexuales.

Un ejemplo, realmente curioso, de cómo las diferencias parecen desaparecer son las hienas moteadas (*Crocuta crocuta*) que habitan en África. En esta especie ambos sexos presentan comportamientos promiscuos y agresivos, y las hembras pueden llegar a dominar a los machos. El parecido entre ambos sexos es tan grande que es difícil distinguir a los

machos de las hembras, incluso observando sus genitales. Las hembras poseen un clítoris elongado y eréctil que parece un falso pene y, a través del cual, copulan, orinan y dan a luz. La plétora de comportamientos comunicativos que están vinculados con el cortejo sexual es enorme y existen, de una forma u de otra, en casi todas las especies animales.

El conflicto intrasexual

Aunque también se da entre hembras, el ejemplo más claro de comunicación en un conflicto dentro de individuos del mismo sexo es el que se produce en las peleas que afrontan los machos para conseguir un territorio y hembras con las que copular. Cornamentas, cantos, olores…, señales de todo tipo se han empleado en las distintas especies animales como señales para especificar la capacidad de combate o el estatus que un macho posee en la jerarquía de dominancia. Señales que permiten evitar, a veces, meterse en una pelea que está perdida de antemano o que, simplemente, puede resultar excesivamente costosa.

El conflicto entre hermanos

Las peleas entre hermanos por la atención de los padres no es una cuestión exclusiva del ser humano. En las aves es muy común el conflicto por ser el pollo que mejor alimentado está dentro del mismo nido. Las señales para pedir comida van desde las vocalizaciones desesperadas por comer a algunas manchas de colores que aparecen dentro del pico de los pollos. El que mejor come, más crece, más sobrevive…

El conflicto entre padres e hijos

Mientras que cada hijo tratará a toda costa de ser el que más alimento y mejor cuidados recibe por parte de los padres, los recursos son limitados y los progenitores tratarán de repartir todos los recursos por igual entre todos los hijos que tengan a

lo largo de su vida. El esfuerzo que el padre y la madre inviertan en criar a sus hijos durante una generación, se cree que reducirá el esfuerzo que harán para sacar adelante las generaciones siguientes. Por lo que, para no comprometer su eficacia biológica total o apostarlo todo a una única cría u ocasión reproductiva, deben repartir los recursos de manera que puedan sacar adelante tanto a los hijos actuales como a los que tendrán en el futuro. Los intereses de los padres son parcialmente opuestos a los de los hijos.

Pero no todo es conflicto en el panorama comunicativo. Existen casos en los que hay intereses comunes que no comprometen la eficacia biológica de ninguno de los dos individuos involucrados en la interacción, o incluso la incrementa. Como cuando una abeja danza para comunicar a otras abejas de su colonia dónde se encuentran las flores más próximas y llenas de néctar. Sin embargo, el conflicto parece estar en el centro de las grandes preguntas acerca de la comunicación, ¿qué sentido tiene fiarse de las señales de un rival?

CAPÍTULO 4

Los mimbres de la evolución

De la variabilidad genética y fenotípica

Un ser vivo, un organismo, vive dentro de una población con otros individuos de la misma especie. Delimitar lo que es una especie es muy complicado y hay distintos criterios que se aplican en función del contexto. Pero, en general, se admite que una especie agrupa a los individuos que son capaces de reproducirse entre sí y que responden a unas características, normalmente en relación con su aspecto, que son comunes. Por ejemplo, el término *Larus michaelis* sirve para nombrar a todos los individuos que responden a las características que reúne la gaviota patiamarilla, cuyos rasgos distintivos, según la Sociedad Española de Ornitología, son: patas amarillas, pico anaranjado y punta roja, presencia de anillo ocular, dorso gris oscuro y vientre blanco.

La taxonomía, la rama de la biología que se ocupa de la clasificación de los seres vivos, agrupa las especies en géneros (*Larus*), a los géneros en familias (Laridae), a las familias en órdenes (Charadriiformes), etc., y va agrupando a los organismos en cajones cada vez más grandes (o separándolos en cajones más pequeños, si lo pensamos en sentido inverso). Esa clasificación es útil para entender la naturaleza, pero, a la vez, puede limitar un poco nuestra comprensión del fenómeno evolutivo.

Los sujetos de la evolución son los genes de los individuos, por lo que generalmente hablamos de individuos. Estos se agrupan en poblaciones para vivir y reproducirse con otros individuos de su especie. Cada población es donde se produce la evolución de los individuos, ya que cada una está más o menos separada y aislada reproductivamente de las otras poblaciones de la misma especie. Los cambios en los individuos no se producen en todas las poblaciones de forma coordinada y a la vez, sino que cada población tiene una dinámica evolutiva propia que es independiente de las otras poblaciones. Es decir, que las diferencias en las características del medio, en la cantidad de alimento disponible, en el riesgo de depredación y también diferencias en los genes de los individuos de las poblaciones, en su pirámide de edades, en las proporciones entre sexos… hace que los individuos que más se reproducen, y los genes que más se heredan, sean diferentes en cada población. Sin embargo, esto no quiere decir que las poblaciones estén siempre genéticamente aisladas, ya que es común que exista un cierto flujo migratorio entre ellas. Por todo esto, a lo largo del libro también hablamos más a menudo de poblaciones que de especies. Pero, ahora, hablemos de variabilidad.

Los individuos de una especie varían entre sí. Depende de la óptica con la que miremos, encontraremos diferencias entre sexos, entre edades, entre individuos del mismo sexo y de la misma edad… Esas diferencias se acrecientan a medida que comparamos entidades ecológicas más grandes. En principio, dos individuos de una misma especie, por ejemplo, de gaviota patiamarilla, que sean miembros de una misma población serán más parecidos que otros dos que vivan en poblaciones separadas por cientos de kilómetros, por ejemplo, una gaviota de las islas Baleares y otra de la costa gallega. De la misma manera, dos individuos de especies del mismo género, como la gaviota patiamarilla o la gaviota argentea (*Larus argentatus*), serán más parecidos que dos individuos, también de la misma familia, pero de distinto género, como, por ejemplo, las gaviotas

patiamarilla y argentea (*Larus*) con la gaviota de reidora (*Chroicocephalus ridibundus*).

Las diferencias podemos verlas a simple vista, pero, en realidad, para estudiarlas de forma concreta debemos hablar de rasgos o caracteres de cada individuo; esto es, una propiedad medible de los organismos (morfológica, fisiológica, conductual). Prácticamente todo lo que podamos observar y medir de un organismo. Sin embargo, lo que nos interesa desde un punto de vista de la ecología evolutiva suelen ser los rasgos funcionales, aquellos que influyen en su eficacia biológica.

En un primer lugar, los rasgos de un organismo vienen determinados por su genoma, lo que llamamos el genotipo. Pero debemos tener en cuenta que la expresión de este genotipo, su fenotipo, es el conjunto de sus rasgos morfológicos, sus colores, su comportamiento, etc., pero también aspectos no observables a simple vista como rasgos fisiológicos. En realidad, el fenotipo es el resultado de la interacción del genoma con el ambiente en el que el organismo se desarrolla.

¿Qué entendemos por *ambiente*? Pues todos aquellos entornos en los que el organismo se desarrolla y vive. Son aspectos de todo tipo, como la cantidad y la calidad de la comida, el nivel de riesgo ante depredación, el nivel de estrés, las interacciones sociales establecidas, las condiciones climatológicas soportadas, las enfermedades padecidas, etc. En general, podemos entender que el ambiente, en último término, influye de dos formas: en la expresión genética y en la respuesta fisiológica del organismo. Esta influencia del ambiente determina el fenotipo del individuo, pero lo que interesa a nivel evolutivo son los rasgos que son heredables y que se transmitirán a la generación siguiente.

Las fuentes de variabilidad más importantes, por su relevancia a la hora de generar nuevos fenotipos, son las de tipo genético; en concreto, las mutaciones o los cambios en la secuencia de ADN. Expliquémoslo de manera sencilla. El ADN es una molécula que está formada por dos cadenas de nucleótidos paralelas entre sí; los nucleótidos son los eslabones de cada una de estas cadenas y son de cuatro tipos distintos,

dependiendo de si contienen adenina (A), timina (T), guanina (G) o citosina (C), que son unos compuestos químicos llamados bases nitrogenadas. Estas bases son los puntos en los que se unen las dos cadenas paralelas; que también se consideran complementarias porque, si en una de las cadenas encontramos adenina, en la otra encontraremos timina, o si en una encontramos guanina, en la otra encontramos citosina. Estos pares de bases se unen entre sí por medio de enlaces químicos denominados puentes de hidrógeno, lo que provoca que las cadenas de ADN también se unan. Lo sorprendente es que el orden específico de los nucleótidos en cada cadena, por ejemplo, ACTAACTGAA, es lo que constituye la información genética. Cada grupo de tres letras, el codón, se corresponde con una orden que se da a la maquinaria celular para que ensamble los aminoácidos, las piezas de las proteínas. Es el código genético, las instrucciones de montaje de las proteínas.

Cada conjunto de instrucciones para una cadena proteica, formado por una secuencia completa de ADN con varios tripletes de nucleótidos, es un gen y el conjunto de todos los genes que porta un individuo es el genoma (o su genotipo). Las mutaciones son cambios en el orden de las secuencias de letras en el ADN, ya sea porque cambia el orden de uno de los nucleótidos (pasa de **AC**TTA a **CA**TTA), porque se elimina uno de ellos (de A**C**TTA a ATTA), porque se introducen nuevos nucleótidos (de ACTTA a A**G**CTTA) o porque se sustituye un nucleótido por otro (de A**C**TTA a A**G**TTA).

Se suele decir que las mutaciones son aleatorias, pero esto no es equivalente a decir que suceden por casualidad, sin causa aparente o que todas tienen la misma probabilidad de ocurrir; hay algunas que son más probables que otras. ¿Por qué se producen las mutaciones? Hay dos causas fundamentales. La primera es intrínseca al propio funcionamiento de la maquinaria de procesamiento en la célula: cada vez que una célula se divide, el ADN debe copiarse antes de repartirse entre las dos células hijas, y, como en cualquier proceso de copia, se producen algunos errores. Hay otro proceso que también produce cambios en el ADN y que se da en los

organismos que tienen reproducción sexual: la recombinación. Cuando se produce la división celular que da lugar a los gametos (espermatozoides y óvulos), el ADN se duplica haciendo una copia de sí mismo y luego se empaqueta en los cromosomas que se unen entre sí por pares formando una equis (sobrecruzamiento) antes de dividirse en cuatro células (no en dos como en el resto de las células). Es en este proceso de empaquetamiento y división del material genético cuando pueden producirse errores que provoquen cambios de secuencias de ADN. Esta variabilidad genética tendría efecto únicamente en el individuo que se genere por medio de ese gameto y, si no confiere a su portador alguna ventaja y acaba heredándose, no tendrá efecto en la población.

Las otras causas de mutaciones se deben a influencias externas llamadas agentes mutagénicos, que pueden ser de carácter físico, como algunas radiaciones electromagnéticas (ultravioleta, alfa y gamma); de carácter químico, como algunos fertilizantes o el ácido nitroso, y de carácter biológico, fundamentalmente virus que incorporan su propio material genético a las células.

Cuando suceden mutaciones y cambios en el ADN pueden suceder tres cosas: que pasen desapercibidos y no produzcan ningún efecto en el organismo; que tengan efectos negativos, como producir enfermedades o ser letales; o que sean beneficiosos, al producir una variante fenotípica nueva o un rasgo que resulta ventajoso en un ambiente determinado. Este último efecto de las mutaciones es el que nos va a ayudar a la hora de entender cómo actúa la selección natural sobre los rasgos de los organismos.

Además, el propio ambiente influye en la propia regulación de la expresión genética (epigenética) favoreciendo o impidiendo la expresión de ciertos genes. Esto supone que dos individuos clónicos a nivel genético, como dos hermanos gemelos, si se desarrollan en ambientes distintos, pueden tener fenotipos diferentes. Las fuentes de variación son muy numerosas y la variabilidad fruto de ella muy grande también.

Eficacia biológica, deriva genética y selección natural

Los rasgos que realmente interesan en el proceso evolutivo son los susceptibles de ser heredados por la siguiente generación. Esos rasgos serán funcionales si tienen alguna característica que les permita incrementar la eficacia biológica de los individuos. Es decir, si les permite sobrevivir hasta reproducirse más que sus competidores, de manera que sus genes y sus rasgos asociados sean los más comunes en la siguiente generación.

Parece lógico pensar que un organismo solo tiene que sobrevivir lo suficiente para poder reproducirse, pero llegar a hacerlo no es tan fácil. Algunos autores estiman que entre el 60 y el 70% de los animales en una población no llegan a reproducirse nunca y, aunque esta estimación es demasiado gruesa y no es un patrón que pueda aplicarse a todas las especies, nos indica que es realmente difícil llegar a tener descendencia. Además, lo relevante para que se produzcan cambios evolutivos no es reproducirse, sino que, en una población, unos individuos se reproduzcan más que otros. Las causas de que no todos los organismos lleguen a tener descendencia y de que haya diferencias en cuántas crías dejan en la población los que llegan a reproducirse se deben principalmente a dos factores completamente distintos: uno es la deriva genética y el otro, la selección natural.

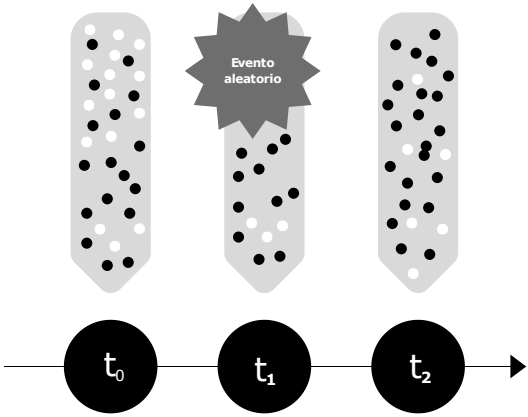
Detengámonos primero en la deriva genética. Imaginemos una población en la que hay un acervo genético (el conjunto de genes de una población) determinado y que experimenta un evento ambiental extremo como por ejemplo una sequía, un incendio, una erupción volcánica que acaba con la mitad de la población (figura 4). El número de individuos se reducirá, pero desde el punto de vista evolutivo lo que se ha perdido es gran parte de ese acervo genético (o efecto de cuello de botella). Los supervivientes puede que no tengan un conjunto de genes que sea representativo del acervo genético que existía en la población antes del evento, pero, irremediablemente, los

genes que queden serán el sustrato de la herencia para las generaciones venideras. Con el tiempo, es posible que se restablezca el número de individuos de la población, pero, probablemente, su acervo genético será muy diferente del que tenían sus ancestros en la población original. Esto se debe a que los genes de los descendientes estarán determinados por los del pequeño grupo que sobrevivió al evento. De hecho, podría llegar a ser tan diferente que considerásemos a ambos grupos como especies diferentes. Habría nacido una nueva especie.

Para que tenga lugar la deriva genética no es necesario que exista un evento que liquide a la mitad de la población; por azar, puede que algunos individuos experimenten accidentes que les impidan sobrevivir y por ello cambien el acervo genético de la población, aunque en mucha menor medida. O puede que esa pérdida de genes se deba a que hay individuos que emigran a otro lugar. En este aspecto es también importante contemplar que, si algunos individuos de una población se desligasen de ella, colonizasen otro lugar y comenzasen a reproducirse, tendríamos un efecto similar al del evento extremo (o efecto fundador). Sin embargo, para que tenga lugar la deriva genética no hace falta necesariamente que se pierda contenido genético de una población; la deriva genética se puede dar cuando existan diferencias en la frecuencia con que unos determinados genes aparecen en los individuos. Si, por ejemplo, en una población los individuos tienen tres genotipos diferentes que llamaremos A, B y C, y en porcentaje están repartidos en la población de la siguiente manera: A (20%), B (60%), C (20%), lo más probable es que la mayoría de los individuos se emparejen con los del genotipo B. Esto, poco a poco, conducirá a que se incremente más todavía el porcentaje de individuos B, simplemente por probabilidad. La población estaría evolucionando sin que la selección natural estuviese interviniendo. Es lo que sucede en la población después de que se produzca un cuello de botella o un efecto fundador y las proporciones de los distintos fenotipos cambien.

Figura 4

Aquí se puede apreciar que los genes están representados por los puntos negros y blancos, y que, tras un accidente o catástrofe (evento aleatorio) que mata a la mitad de la población, la proporción de genes que quedan en el momento t_1 son muy distintos de los que había en el momento t_0. La deriva genética hace que los negros sean mayoría en t_2.



Aunque la deriva genética parece un mecanismo evolutivo importante, el mecanismo por antonomasia que explica cómo las distintas variantes se fijan en una población, porque son adaptativas, es la selección natural. Esta se basa en los principios que hemos estado manejando hasta ahora: los individuos varían entre sí en sus rasgos y, por ello, en su capacidad de sobrevivir y de reproducirse en un ambiente determinado. Veámoslo en detalle.

Cuando se dice que un organismo tiene la capacidad de adaptarse a su ambiente, normalmente, se entiende esa adaptación como si el organismo tuviese cierta flexibilidad para lidiar con los desafíos ambientales. Eso es cierto, todos los organismos tienen cierta capacidad de resistencia para soportar los embates de la climatología, de las enfermedades, de la interacción con otros organismos… Pero cuando hablamos de evolución nos estamos refiriendo a una cosa muy distinta.

Una adaptación, desde un punto de vista evolutivo, es cualquier característica del organismo que aumenta su eficacia biológica, supervivencia y reproducción, en comparación con la eficacia biológica del resto de organismos de su especie con los que vive y compite.

Como vemos, la definición es muy amplia y se podría pensar que prácticamente cualquier rasgo de un organismo podría ser una adaptación. Sin embargo, esto no es así. Veamos un ejemplo relacionado con la comunicación para entenderlo mejor: muchas lagartijas utilizan las secreciones de sus glándulas femorales, situadas en la parte inferior de las patas posteriores de los machos, para marcar su territorio. Estas secreciones constituyen una mezcla de numerosos compuestos, entre los que están colesterol, ácidos grasos, ésteres, alcoholes, vitaminas… Podemos pensar que la capacidad de secretar cada uno de esos compuestos es una adaptación a la excreción de esos compuestos cuando son demasiado abundantes en el organismo y pueden suponer un problema. Sin embargo, muchos de estos compuestos no suelen ser especialmente abundantes, sino relativamente escasos y, además, cumplen algunas funciones metabólicas muy relevantes, por lo que son muy valiosos y resulta un poco extraño que se secreten de forma indiscriminada. Pero una explicación alternativa es que esa secreción también podría constituir una forma de excreción de los compuestos que le sobran. Un estudio un poco más detallado de los compuestos nos muestra que algunos de ellos sí están implicados en la comunicación intraespecífica y que sirven para medir la habilidad combativa del rival (colesterol) o para atraer a las hembras (vitaminas y ácidos grasos). En este punto podemos decir que la secreción de ambos compuestos constituye un rasgo funcional, puesto que cumple una función en comunicación. Sin embargo, no está tan claro que constituyan verdaderas adaptaciones. Esto solo podríamos decirlo si el hecho de contener más cantidad de colesterol en las secreciones contribuyese a su supervivencia, porque se defienden mejor de sus rivales; o secretar más cantidad de

vitaminas contribuye a su reproducción, porque así consiguen atraer a más hembras con las que copular.

Comprobar experimentalmente si un rasgo constituye una verdadera adaptación evolutiva supone un gran desafío y, siendo rigurosos, a menudo debemos considerar estos rasgos únicamente como adaptaciones potenciales. En ciencia a veces no es posible llegar a conclusiones definitivas, aunque sí podemos acercarnos a la verdad por la acumulación de evidencias. Uno de los aspectos que apunta que las secreciones de las lagartijas son verdaderas adaptaciones es que se ha visto que, en dos poblaciones alejadas que difieren en su temperatura y grado de humedad, la composición cambia y se adecua para que la difusión de los olores se retarde todo lo posible y que la señal sea más duradera en cada uno de los ambientes. Parece que todo apunta a que las secreciones han experimentado un proceso de selección que ha configurado su composición tal y como es actualmente en cada lugar. ¿Cómo ha podido producirse esta selección? Hagamos un ejercicio de imaginación para explicarlo (será una explicación válida y probable, pero que en todo momento debe entenderse como una hipótesis, puesto que no está comprobado que realmente haya sucedido así). Imaginemos que un grupo de lagartijas coloniza una zona nueva y establece una población. En este grupo los machos varían en la composición de sus secreciones, unos tienen más colesterol, otros más alcoholes, otros menos ácidos grasos… Los machos también difieren en cierto grado en otros rasgos, como su tamaño, su edad, su color. Todos estos machos compiten por tener territorios grandes con suficiente cantidad de recursos como alimento o zonas de asoleamiento, pero también por conseguir más hembras. Para ello, defienden y marcan las piedras con sus secreciones con el objetivo de mostrar su propiedad del territorio, atraer a las hembras y tratar de repeler a otros machos competidores. Sin embargo, por su composición, habrá algunas secreciones que serán más duraderas en función de las condiciones locales ambientales de temperatura y humedad. Esos machos que marcan con las secreciones que más aguantan en ese ambiente podrán destinar

más tiempo y energía a repeler competidores y a conseguir copular con más hembras, mientras que los que tienen secreciones cuya composición no permite una marca duradera en ese ambiente tendrán que destinar más tiempo a marcar en vez de a conseguir más cópulas. Es fácil concluir que los primeros tendrán una ventaja sobre los segundos a la hora de reproducirse y que, probablemente, conseguirán tener más crías. Además, si la composición de las secreciones es heredable, sus descendientes también se beneficiarán de esta señal y, a su vez, serán los que más se reproduzcan mientras las condiciones ambientales sean similares a las de sus padres. Poco a poco, las secreciones de la mayoría de los individuos de la población, que serán descendientes de estos individuos, estarán cada vez más adaptadas a las condiciones ambientales del hábitat en el que reside la población.

Resumamos cómo ha sucedido esto: 1) existe variabilidad en la composición de las secreciones de los machos, 2) las condiciones ambientales influyen en que las secreciones de unos machos sean más ventajosas que las de otros, 3) esa ventaja conduce a que unos machos consigan tener más crías que otros; 4) si la composición de las secreciones es heredable y las condiciones ambientales no cambian, sus crías también tendrán secreciones más ventajosas que las de los otros machos; 5) poco a poco la mayoría de los individuos de la población descenderá de estos machos que tuvieron las mejores secreciones en cada momento para esas condiciones ambientales.

En realidad, el proceso es mucho más complejo, porque debemos tener en cuenta que los factores que causan la selección no solo actúan en la reproducción, sino que también lo hacen en la supervivencia. Esos machos deberían haber sido capaces de responder a desafíos ambientales como las enfermedades, la obtención de alimento o la huida de los depredadores para sobrevivir hasta reproducirse. Pero lo hemos simplificado para entender qué factores, presiones de selección podrían estar actuando. Una

presión de selección es cualquier causa que produzca que unos individuos (sobrevivan y) se reproduzcan más que otros y, por tanto, influye en los genes y rasgos que se van a heredar en las generaciones sucesivas. Es el individuo el que transmite sus genes a la siguiente generación, no la especie, por lo que es el individuo el sujeto de selección. No se trata de ser el mejor, sino de ser mejor que sus competidores a la hora de reproducirse; ni tampoco de simplemente reproducirse, sino de dejar todas las crías posibles en la siguiente generación. Por último, la selección natural no tiene por qué funcionar sobre aspectos que son muy diferentes en magnitud, sino que pequeñas diferencias en longitud, peso, intensidad, fuerza, habilidad… pueden suponer tener un poco más de ventaja con respecto a los otros competidores.

De todos estos aspectos, podemos deducir que el éxito reproductivo individual no es importante en sí mismo (una, dos, tres crías), sino que solo importa en comparación con la eficacia biológica del resto de la población. Cuando hablamos de incrementar la eficacia biológica, nos referimos a tener más éxito reproductivo que los demás. Eso es lo que determinará el camino evolutivo que seguirán los rasgos generales de la población, y de la especie, en generaciones sucesivas.

Desde un punto de vista de la comunicación animal, los rasgos que podrían incrementar la eficacia biológica de los individuos serán aquellos que permitan emitir o recibir una señal que les aumente las probabilidades de sobrevivir, como aquellos implicados en las interacciones con los depredadores, o aumentar sus probabilidades de reproducción, como los implicados en comunicaciones en la competencia por las hembras o en la atracción sexual. Todos los aspectos que permiten la recepción y la emisión de señales en los animales, de los que ya hablamos en la primera parte del libro; fueron seleccionados en el curso de la evolución por la ventaja que suponían con respecto a la recepción y emisión de señales que realizaban otros animales competidores.

Selección natural, selección sexual y selección social

Hasta ahora hemos hablado de selección natural; sin embargo, se han propuesto dos tipos de selección que tienen particular relevancia en el mundo animal. El primero fue propuesto por Charles Darwin en su libro *El origen del hombre y la selección en relación al sexo*. Darwin se percató de que las presiones evolutivas que actúan en la cuestión sexual merecen una consideración aparte del resto de presiones. Y es que hay algunos rasgos que resultarían paradójicos si los contemplásemos únicamente desde el punto de vista de la supervivencia. El ejemplo clásico que se utiliza para ilustrar esto es la cola del pavo real (*Pavo cristatus*); una cola de plumas enorme, abierta en abanico, con muchos colores, pero inútil para el vuelo. Si la clave de la selección es la supervivencia, ¿cómo ha podido seleccionarse un rasgo que parece ser un atrayente de depredadores y que impide la huida? Darwin propuso que la carga de la selección, si no estaba en la supervivencia, debería estar en la reproducción y, a partir de ahí, miles de investigadores han tratado de desentrañar el origen evolutivo de estos aspectos.

Actualmente, se concibe que la selección sexual está constituida por dos procesos que vienen determinados por la diferencia en los costes y la inversión que cada sexo debe asumir en la reproducción. Mientras que los machos producen una cantidad de gametos enorme, las hembras tienen un número limitado disponible para la reproducción. Para entender la magnitud de la diferencia en cantidad de gametos, veamos el caso de los humanos. Según los datos de las Naciones Unidas, en el mundo hay, en 2023, un 50,5% de hombres y un 49,5% mujeres (ambas fuentes coinciden en los porcentajes). En noviembre de 2022, superamos por primera vez los 8000 millones de personas, de las cuales 4040 millones corresponderían a hombres y 3960 millones a mujeres.

Una mujer produce unos 400 óvulos en toda su vida y un hombre unos 180 millones de espermatozoides en cada eyaculación. Una cuenta rápida nos proporciona el sorprendente

dato de que, con apenas 22 eyaculaciones, un solo hombre podría fecundar, teóricamente, a todas las mujeres del mundo. Sin atender al coste energético que supone la producción de espermatozoides y óvulos, podemos sospechar que una diferencia numérica tan desproporcionada en la capacidad de producción podría suponer una diferencia de oportunidades de reproducción entre sexos muy grande. Mientras que un sexo tiene oportunidades prácticamente ilimitadas de fecundación, el otro tiene un límite claro de oportunidades. Dejemos ahora el ejemplo humano y quedémonos en esta diferencia.

También se ha planteado que estas diferencias no son una cuestión únicamente de cantidad de gametos, sino de cuánta energía y recursos invierten en la reproducción y la cría cada uno de los padres. Los óvulos constituyen un verdadero almacén con todos los recursos energéticos y nutricionales necesarios para que el embrión salga adelante; mientras que los espermatozoides son únicamente unos vehículos de ADN que no aportan ningún recurso energético al desarrollo de las crías. No solo los óvulos son mucho más costosos de producir que los espermatozoides, sino que nos revela que existe una diferencia en la inversión en la reproducción desde el mismo momento de la gametogénesis. Mientras las hembras aportan muchos recursos, los machos solo aportan su ADN. Esta diferencia en inversión puede aparecer también en la producción e incubación de huevos, el embarazo, en los cuidados de alimentación… Todo esto llevó a pensar que podría existir una diferencia en los intereses y estrategias reproductivas de cada uno.

Antes de proseguir, es conveniente apuntar que, aunque hablemos de machos y de hembras atribuyéndoles unas características y un rol en los procesos que podrían parecer únicos de su sexo, debe tenerse en cuenta que, como en casi todo en biología, siempre hay excepciones a los patrones generales; por ejemplo, existen especies en las que la carga de recursos totales invertidos, en gametos, en reproducción y en crianza, no está balanceada hacia las hembras, sino al revés.

Pensemos de nuevo en términos de eficacia biológica. Mientras que los machos, que tienen teóricas posibilidades

ilimitadas de reproducción, seguirían una estrategia basada en conseguir el mayor número de fertilizaciones posible, las hembras, dado que tienen un número de gametos limitado, deberían seguir una estrategia basada en la elección de pareja por su calidad. Cantidad frente a calidad. Estas estrategias se concretan en dos procesos que siguen los dos sexos de forma independiente, pero que, inevitablemente, se entrecruzan y complican la selección. Los machos compiten entre sí por las hembras, mientras que las hembras tratan de elegir al mejor macho con el que reproducirse. La competencia entre machos (intrasexual) abarca todos los procesos relativos a la lucha territorial y, de manera indirecta, también la competición de espermas que se produce tras las cópulas si una hembra ha copulado con distintos machos (competencia espermática). La elección de pareja incluye todos los mecanismos por los que las hembras evalúan la calidad de los machos y cómo ellos muestran su calidad en función de las señales que emiten. En conjunto, la competencia intrasexual y la elección de pareja reúnen las presiones de selección que, sin estar relacionadas con la supervivencia, hacen que unos genes se hereden más que otros en el tiempo, y que, como consecuencia, produzcan los caracteres sexuales secundarios, que no sirven estrictamente para reproducirse, sino para conseguir mayor éxito reproductivo. En el capítulo 8 veremos detenidamente cómo la selección sexual ha sido clave para explicar el origen de la señalización.

La selección sexual es concebida como un subtipo de otro tipo, la selección social, que fue propuesta por el etólogo británico John H. Crook y desarrollada por la bióloga teórica estadounidense Mary Jane West-Eberhard. Es el tipo de selección que se debe a cualquier forma de competencia social intraespecífica, no solo sexual. Ellos plantearon que hay situaciones de interacción entre individuos de la misma especie que pueden llevar a seleccionar ciertos rasgos y que no están relacionados con el sexo. Se podría diferenciar de la selección natural (no social) en que la eficacia biológica del individuo no está únicamente determinada por su propio fenotipo, sino

por los fenotipos y genotipos de los otros individuos con los que interactúa. La selección sexual es un subtipo de selección social, porque la eficacia biológica de una hembra, por ejemplo, no solo viene determinada por su propio fenotipo, sino que el fenotipo y el genotipo del macho con el que se aparee tienen una gran influencia en el número de descendientes que tendrá. Por ejemplo, si se aparea con un macho con muy buenos genes, sus crías tendrán más probabilidad de salir adelante que si se aparea con un macho que porta una enfermedad congénita.

Existen otras situaciones en las que se da selección social no sexual. Por ejemplo, en una relación de competencia por recursos alimentarios entre dos individuos, en las relaciones padres-hijos o en cualquier tipo de interacción que se dé entre conespecíficos (individuos de la misma especie) fuera de la temporada reproductora y que implique un conflicto de intereses. No obstante, el funcionamiento de la selección, ya sea social, sexual o natural, sigue siendo el mismo: los individuos, en su interacción con el ambiente (social o no social), lidian con los desafíos que se les plantean; algunos de ellos determinantes en su capacidad de sobrevivir y de reproducirse y haciendo que unos se reproduzcan más que otros y, por tanto, que determinen las características de la siguiente generación.

La explicación de este proceso puede llevar a la concepción errónea de que la evolución es un proceso de perfeccionamiento de las especies por medio de la selección de los individuos más adaptados. Esto no puede estar más alejado de la realidad. Dado que el ambiente cambia constantemente, también lo hacen las presiones de selección; esto hace que no exista una dirección concreta en la evolución de los rasgos. Puede que este pensamiento esté provocado por que la selección actúa sobre los rasgos y materiales que ya existen. No va a surgir una nueva especie de pájaro a partir de una mutación en una bacteria, las aves que vemos actualmente son el resultado de millones de años de cambios que se han ido acumulando desde, al menos, los dinosaurios. Pero no existía un plan pretérito ni un objetivo ni una dirección

evolutiva planificada que nos condujese a este resultado. La evolución, como ya defendió Jaques Monod, premio nobel de Fisiología o Medicina en 1965, es fruto del azar y de la necesidad. La aleatoriedad implícita en un ambiente impredecible y cambiante y en un sustrato genético mutable, así como la necesidad determinada por un proceso en el que se conjugan variabilidad, desempeño de los organismos, tiempo y herencia.

CAPÍTULO 5

Cuestión de economía

Variación intraindividual

Hemos hablado largo y tendido en el capítulo anterior acerca de cómo los rasgos de los organismos presentan una amplia variabilidad. Esta variación, decíamos, se produce, y se incrementa, a medida que ascendemos por cada nivel de organización ecológica: variabilidad entre individuos, entre poblaciones y entre especies. Sin embargo, existe también un tipo de variación en ciertos rasgos que se produce en un mismo individuo. Esa variabilidad intraindividual es de dos tipos, una dependiente del tiempo y la otra dependiente del contexto. La primera es con la que más familiarizados estamos, ya que la conocemos por propia experiencia, son aquellas "cosas de la edad" y que están determinadas por el propio transcurrir entre las etapas de infancia, adolescencia, juventud, adultez y vejez. Nuestros rasgos, nuestro fenotipo, cambian a medida que pasa el tiempo; no tenemos el mismo aspecto cuando nacemos que cuando somos viejos. Pero recordemos que el fenotipo no es solo el aspecto físico, sino que también contempla rasgos comunicativos como la voz; existe una gran variabilidad entre la voz fuerte de un bebé nada más nacer, la de un adolescente al que le salen trinos o la voz débil o ronca de un anciano (que se conoce como presbifonía). También vemos esta variabilidad

en la percepción de estímulos, como la pérdida de audición o la vista cansada (la presbicia) a partir de los 40 años. Nuestro fenotipo varía dependiendo del momento de la vida en el que nos encontremos y los cambios en el fenotipo se deben al desarrollo y crecimiento o al desgaste producido por la vejez.

El segundo tipo de variabilidad es la plasticidad fenotípica, que es dependiente del contexto específico en el que el organismo se encuentre, en otras palabras, el ambiente inmediato que lo rodea. El fenotipo de un individuo puede ser plástico, cambiar en respuesta a los estímulos que recibe de su entorno, pero, obviamente, manteniendo inalterado el genotipo. Un ejemplo muy sencillo de plasticidad fenotípica es el cambio que experimentamos en nuestra piel tras pasar unos días al sol; aunque nuestro genotipo no cambia, sí lo hace nuestro fenotipo, puesto que nos ponemos más morenos. En este caso, es un cambio gradual, relativamente rápido y reversible, pero la plasticidad fenotípica puede ser apreciable en morfología, fisiología, la historia de vida de cada organismo y, también, en el comportamiento. De hecho, la plasticidad conductual es todo un campo de estudio en el que se incluye la plasticidad comunicativa.

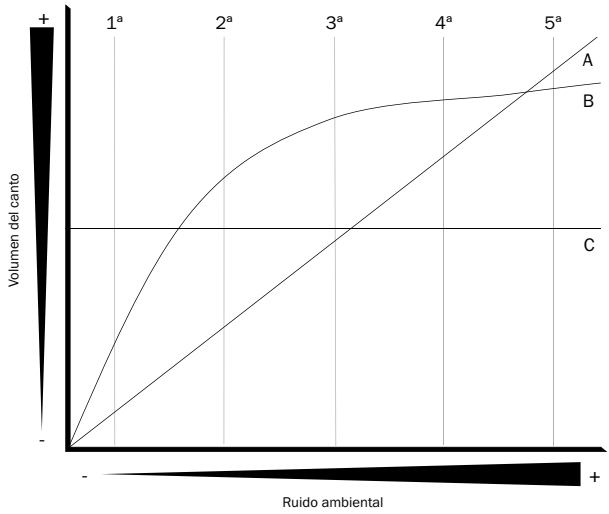
En comunicación, la variación intraindividual la encontraremos tanto en la emisión como en la percepción de las señales y, como en los otros casos, la plasticidad contribuye a vivir de acuerdo con las condiciones ambientales. Para entenderlo fácilmente: no nos comunicamos igual con nuestros padres, con nuestros hijos, con nuestros jefes, en una manifestación o animando a nuestro equipo de fútbol. Nosotros nos mantenemos iguales, pero como el contexto cambia, nuestra comunicación también lo hace. Lo mismo podemos apreciar en los animales, aunque puede llegar a ser complicado medirlo y distinguirlo de algunos rasgos que han sido seleccionados. Sobre todo, porque la propia plasticidad también es un rasgo que puede ser seleccionado.

Imaginemos que queremos estudiar si existe plasticidad en el canto de una rana en función del nivel de ruido ambiental. Es decir, queremos saber si las ranas son capaces de

modular el volumen de su canto dependiendo del ruido que exista. Para ello medimos el volumen del canto de la rana con un sonómetro y manipulamos el ambiente sonoro reproduciendo en altavoces un ruido blanco. Para ver si hay plasticidad debemos probar varias veces a los mismos individuos en distintos ambientes, por lo que los probaremos con diferentes intensidades de sonido haciendo un gradiente que vaya de menos a más intensidad. Una vez hemos recopilado los datos, vemos si hay algún tipo de relación entre las dos variables (figura 5). Si el volumen de los cantos cambia en función del ambiente, dentro de cada individuo, entonces sí que habrá plasticidad comunicativa.

Figura 5

Relación (hipotética) del volumen del canto en función del nivel de ruido medido en cinco ocasiones consecutivas sobre los mismos individuos. Las líneas A y B muestran plasticidad del volumen del canto: en la línea A, vemos que se produce un aumento del volumen del canto a medida que aumenta el ruido, mientras que en la B esto se produce hasta un momento en que no es posible aumentar más el volumen. La línea C muestra que, aunque incremente el nivel de ruido, el volumen del canto no varía, es decir, no hay plasticidad frente al nivel de ruido.



Costes y beneficios

Entonces, ¿por qué los animales se comportan de una forma y no de otra? La gran mayoría de las explicaciones que se han dado toman prestados algunos conceptos del mundo de la economía y los trasladan al plano del comportamiento animal. El concepto más sencillo es que cada comportamiento o actividad tiene asociados unos costes y unos beneficios. Ninguno de los dos se mide, obviamente, en términos de dinero, sino en términos de energía, recursos, riesgo, salud, parejas potenciales… Si tuviésemos que pensar cuál es la divisa o la moneda de cambio con la que se juega en este intercambio, es la probabilidad de sobrevivir y de reproducirse; es decir: hablamos de coste y beneficio, respectivamente, de acuerdo con la probabilidad de reducir o incrementar la eficacia biológica. Veamos un ejemplo muy sencillo para entenderlo mejor.

Imaginemos un animal que se encuentra de frente con un depredador. No sabe si este le ha detectado o no y tiene que decidirse entre huir o quedarse quieto. Teniendo en cuenta que el beneficio esperado en ambos casos es sobrevivir, ¿qué costes potenciales tendrá cada una de las opciones? En el caso de la huida, el animal necesitaría gastar recursos energéticos para huir, pero también asumiría el riesgo de ser visto y capturado por el depredador.

El gasto energético es un coste que puede parecer menor si el animal consigue ponerse a salvo, ya que únicamente afectaría a la cantidad de energía disponible para el resto de actividades y puede que, tras escapar, tenga que invertir tiempo en descansar o en buscar comida para reponerse. Aunque si el animal tarda demasiado en encontrar un escondite, emplea demasiada energía en huir y acaba exhausto, falleciendo o en las fauces del depredador, los costes son los más elevados posibles, definitivos e inmediatos: la muerte. De hecho, el coste de ser capturado se podría medir en términos de riesgo de captura. Si el animal opta por quedarse quieto es porque confía en que las probabilidades de ser visto y cazado por el depredador son pocas; no gastaría energía en huir, pero habría

que tener en cuenta la incertidumbre y el riesgo de haber sido detectado ya por el depredador. Huelga decir que, en un análisis más detallado de ambas opciones, encontraríamos muchos más costes potenciales y también tendríamos que tener en cuenta los posibles beneficios de huir o permanecer quieto; aquí hemos simplificado por cuestiones didácticas y para exponer que, ante un mismo problema, dos comportamientos posibles implican unos costes, pero también unos beneficios, diferentes.

¿Cuál es la mejor estrategia entonces? Aquella que incremente el balance de costes y de beneficios; en otras palabras, la que, asumiendo los menores costes posibles, más incremente las probabilidades de sobrevivir, y de reproducirse. Lo más importante es escapar a un coste tan grande que suponga la muerte y que el balance de los costes asumidos por sobrevivir y reproducirse sea positivo. De hecho, deberíamos plantearnos que realmente el balance importante no es el correspondiente a una actividad concreta, sino el balance final a lo largo de la vida; esto es, el balance habrá sido positivo si, a pesar de los costes, la descendencia que se deja es más numerosa que la de los demás. Como ya dijimos en el capítulo 4, el sentido de la evolución en una población lo marcan los individuos que dejan más genes que sus vecinos en la siguiente generación.

Pero volvamos a los costes y a los beneficios y al sentido que tiene que hablemos de ello en la comunicación animal. ¿Qué tipo de beneficios podrían esperar un emisor y un receptor en un intercambio comunicativo? El principal beneficio del emisor se espera que sea la propia respuesta del receptor; mientras que el principal beneficio del receptor sería tomar la decisión más rentable, responder o no, o responder de una manera o de otra, con mayor o menor intensidad…, en función de la interacción con el emisor.

Veámoslo primero desde el punto de vista del receptor. Cuando el receptor recibe una señal tiene dos opciones, responder o no hacerlo. En cada caso concreto, puede que responder sea beneficioso, como en el caso de un ave que huye

ante una llamada de alerta por depredador, o un coste, si se responde atraído por un señuelo del depredador. Pero, si le damos la vuelta a estas conductas, podrían suponer un coste, en el caso de un ave que no responde ante la llamada de alerta, o un beneficio, en el caso de un animal que no responde ante el señuelo. En definitiva, para el receptor, el coste y el beneficio dependen de cada situación comunicativa concreta y de si la decisión que toma al responder o no a la señal supone una ventaja o una desventaja para la supervivencia o la reproducción.

Desde el punto de vista del emisor, los costes dependen completamente de la emisión de la señal, mientras que los beneficios obtenidos dependerán de si el receptor responde o no a la señal enviada. Por ejemplo, cuando el macho del ruiseñor (*Luscinia megarhynchos*) canta para atraer a la hembra, puede perder hasta un 10% de masa corporal por el esfuerzo que hace. O el tremendo valor de algunos de los compuestos que los machos de muchas especies de lagartos, mamíferos, aves, insectos… destinan a las secreciones químicas y que son muy necesarios para el metabolismo. Ambos son costes que paga el emisor por el hecho de enviar la señal.

Los beneficios, sin embargo, nunca están garantizados, son potenciales; el ruiseñor espera atraer a una hembra con la que reproducirse, pero haber pagado los costes de enviar la señal, no le asegura la respuesta de la hembra. Algunos autores conciben como un coste potencial el riesgo de que el receptor no responda a la señal, ya sea porque el ambiente o su propio sistema sensorial impiden que la perciba, o porque "decide" no responder. Pero, en realidad, la ausencia de respuesta se entiende como un beneficio no obtenido; lo que daría un balance de costes-beneficios negativo.

El coste que es necesario pagar para que la señal sea detectada por el receptor, dependiendo de quién y cómo sea el receptor y el ambiente o contexto en el que se emite la señal, se denomina coste de eficacia y es el que es necesario pagar para que la señal se envíe de forma inequívoca en función de las restricciones que pueden existir en el ambiente y de las

características de los órganos sensoriales que posee el receptor. Un ejemplo clásico es el de las señales de tráfico, que son mucho más grandes en las autopistas que en las carreteras secundarias porque deben ser más legibles y detectables a mayor distancia. Debido a su tamaño, estas señales son más caras, pero es un coste que es necesario pagar si queremos que las señales sean eficaces. Ese es el coste de eficacia.

Otros costes a los que el emisor se enfrenta son más indirectos y están relacionados con el riesgo a ser detectados o atraer a individuos indeseados como depredadores o competidores. Por ejemplo, cuando un macho expresa una señal de colores muy llamativos para atraer a una hembra lleva asociado un riesgo muy grande de ser visto y cazado por un depredador. Pero, como ya hemos mencionado, si ese coste se compensase con el beneficio de haber conseguido fecundar a la hembra, habría merecido la pena afrontar el riesgo puesto que el balance coste-beneficio es positivo al producirse un incremento de su eficacia biológica.

Mencionaremos otros tipos de costes más adelante. De momento, mantengamos en la mente este esquema de costes y beneficios para entender por qué unos animales envían ciertas señales y por qué otros responden a ellas. En el siguiente apartado seguiremos profundizando en los mecanismos que subyacen a esta cuestión.

Trade-offs

El concepto inglés de *trade-off*, que suele traducirse como 'compromiso', pero, dado que donde más se emplea es en el ámbito económico, también se traduce como 'trueque' o 'intercambio'. Como veremos, puede que en el plano ecológico quizás se entienda mejor si hablamos de 'soluciones de compromiso'.

Imaginemos una situación económica muy habitual: un asalariado dispone, a primeros de mes, de una cantidad de dinero concreta aportada por su sueldo. Para llegar a fin de mes tendrá que decidir de la mejor manera cómo destinar

esa cantidad al alquiler, a su alimentación, al ocio, a ahorrar… Para simplificar, vamos a suponer que nuestro trabajador solo tiene que costearse alquiler y alimentación. Puesto que la cantidad de dinero disponible es finita (su sueldo), podrá gastarse más dinero en comer si destina menos dinero al alquiler, y viceversa. La cantidad que destine a un fin dependerá de lo que destine al otro. Decimos que existe un "compromiso" entre esos dos elementos. Y optará, si es un trabajador racional, por la mejor solución de compromiso para conseguir vivir en el mejor lugar posible y alimentarse de la mejor manera posible con los recursos de los que dispone. Eso es un *trade-off*.

Dado que comunicarse implica un gasto de recursos, es habitual encontrarse con la existencia de compromisos económicos, principalmente en el lado del emisor. La inversión que un emisor puede realizar en señalizar dependerá de la cantidad de recursos de que disponga. De manera general, nos referimos a recursos energéticos, pero en realidad son recursos concretos, como dieta, espacio, tiempo, o incluso más específicos aún, como carotenoides, vitaminas, etc. Si un animal invierte desaforadamente en la expresión de una señal, podría estar asumiendo un coste demasiado elevado en términos de supervivencia y acabar muriendo. Veamos ahora un caso real que implica señalización y metabolismo en las lagartijas ibéricas. Algunas de ellas, como la lagartija carpetana (*Iberolacerta cyreni*), utilizan precursores de la vitamina D en las señales químicas con las que los machos marcan las rocas de sus territorios. Sin embargo, como hemos aprendido después de la pandemia de COVID-19, la vitamina D es un compuesto que es muy necesario para tener un sistema inmune fuerte. Cuando las lagartijas necesitan vitamina D para defenderse de enfermedades, no pueden destinar sus precursores a las señales químicas. Existe un compromiso entre la emisión de una señal y la capacidad de mantener la homeostasis interna.

Aunque estrictamente un compromiso se entiende cuando hay recursos en juego, también podemos utilizar este esquema para analizar el comportamiento o la comunicación desde un punto de vista evolutivo. Retomando un ejemplo

que ya hemos visitado, podría existir un compromiso entre la posibilidad de emitir una señal llamativa que atraiga a las hembras, pero que, a la vez, no llame la atención de los depredadores. Si el animal expresa una señal muy poco llamativa, conseguirá pasar desapercibido para los depredadores, pero también para las hembras y, por tanto, no se reproducirá. En el lado contrario, si el animal emite una señal tan llamativa que, aunque atraiga a las hembras, acaba siendo cazado, tampoco se reproducirá. Aunque este caso no implica el uso de recursos, es interesante porque nos permite ilustrar los compromisos evolutivos; nos indica cómo han podido confluir dos presiones de selección, atraer a la pareja y no ser visto por los depredadores, actuando en conjunto para seleccionar aquellos individuos que se mantienen dentro del rango establecido por el *trade-off*. Lo que nos lleva directamente al siguiente punto: ¿existe una manera óptima de comportarse y también de comunicarse?

Comportamientos óptimos, comunicación óptima

Por *óptimo* nos referimos a la manera más rentable de comportarse (o de usar un recurso) en términos de coste-beneficio: en el lado de los costes estarían el gasto de energía, de tiempo o de recursos, el riesgo asumido…, y en el lado de los beneficios estaría la eficacia biológica. La conducta óptima sería la que maximiza el beneficio neto; es decir, la que mayor número de descendientes permite conseguir, al final de la vida y una vez hemos pagado ya los costes de vivir. Cuando hablábamos de los costes y de los beneficios mencionábamos la importancia de que el balance final fuese positivo, mientras que aquí tratamos de ver las diferencias entre los animales que obtienen beneficios y tratamos de dilucidar, por medio de modelos matemáticos, qué conductas son las mejores, las más rentables.

Cada pequeña conducta a lo largo de la vida de un animal, incluyendo sus pequeñas decisiones como huir o permanecer quieto, comer uno u otro alimento, enfrentarse a un

competidor o no, emparejarse con ese individuo o con otro, tiene una manera más rentable, óptima, de hacerse. Y la suma del conjunto de todas y cada una de las actividades, y de los pequeños costes asumidos y pequeños beneficios obtenidos, influyen en el resultado y el balance al final de la vida.

En comunicación, puede haber muchas situaciones susceptibles de optimización. Imaginemos ahora un pájaro macho que se encuentra en la frondosidad de un bosque húmedo, tipo selva, donde es bastante difícil detectar a otros individuos entre la vegetación, y que está tratando de atraer a la hembra con su canto y con una exhibición postural de cortejo. Lo habitual es que el canto se use para atraer a la hembra y la exhibición para conquistarla, una vez la hembra está delante del macho. Como en el caso anterior, vamos a suponer que el pájaro puede optar por dos conductas extremas: una conducta rácana, en la que nuestro macho únicamente canta y desarrolla su exhibición cuando está cien por cien seguro de que la hembra está delante, y una conducta derrochadora, en la que el macho está todo el tiempo cantando y exhibiéndose, aunque no haya detectado a la hembra. Entre estas dos conductas extremas podemos imaginar una tercera conducta en la que el macho canta todo el tiempo para atraer a la hembra, pero solo se exhibe cuando está bastante seguro de tenerla delante. Esta conducta parece más eficiente que las de los machos conservadores y derrochadores y sería óptima si el macho es capaz de modular cuándo canta y cuándo se exhibe, por ejemplo, en función de la probabilidad, o certidumbre, de que haya una hembra en sus alrededores.

Dado que medir el óptimo de todas y cada una de las actividades, comunicativas o no, de un animal es imposible, y que a menudo se desconoce el número total de crías que un individuo deja en toda su vida en la siguiente generación, se supone que el animal que es capaz de comportarse de manera óptima en sus actividades diarias tendrá más posibilidad de incrementar su eficacia biológica al final de su vida. Básicamente, porque esta optimización de la conducta nos muestra que, con respecto a sus competidores, la adaptación a las condiciones

ambientales concretas parece mucho más eficiente. Asimismo, se espera que esta capacidad de tener un comportamiento óptimo también sea heredable. Si un comportamiento ha tendido hacia la optimización en una población, probablemente encontraremos una mayoría de animales que se comportan de forma óptima, y no tantos animales en los extremos subóptimos.

Esto no quiere decir que los animales sean máquinas que se han ido perfeccionando con el tiempo ni que los animales sean racionales y que hagan cálculos complejos para decidir cuál es la mejor conducta; sino que, si las condiciones ambientales se han mantenido estables a lo largo de varias generaciones, puede que la selección natural haya actuado sobre los animales de la población y que, en promedio, los que más se han reproducido son los que han optimizado su comportamiento según las presiones y condiciones existentes. Si en el futuro esas condiciones cambiasen, el comportamiento de los animales que ahora están optimizados podría no ser óptimo y podrían ser seleccionados negativamente.

También puede suceder que existan mecanismos más sencillos que funcionen para determinar la inversión posible o necesaria. Son reglas generales (*rules of thumb*) y que determinan la conducta de una forma simple. En términos de comunicación, pueden actuar, por ejemplo, en los cortejos: vocaliza todo lo alto que puedas, comienza el cortejo cuando la hembra está a menos de la distancia X, fíjate en machos cuyos cuernos tengan un tamaño mínimo de Y… Son reglas subóptimas, pero que permiten el mayor acercamiento posible al óptimo y proporcionan a aquellos individuos que las siguen una mayor eficacia biológica.

Estrategias evolutivamente estables y teoría de juegos

El hilo de la argumentación que llevamos desarrollando a lo largo de este capítulo podría indicar que estamos sugiriendo

que todos los individuos acabarán por comportarse de igual manera si las condiciones ambientales no cambian drásticamente. Sin embargo, el sustrato de la evolución es que la generación de variabilidad y diferencias entre individuos es una constante. No todos los individuos se comportan igual. Incluso cuando las condiciones ambientales se mantienen estables, pueden coexistir distintas conductas que proporcionen a los individuos que las ejecutan eficacias biológicas suficientes como para mantenerse de generación en generación. A veces, tener éxito al comportarse de una determinada manera depende de qué conductas estén desarrollando, a su vez, el resto de los individuos de la población y esta competencia entre animales y sus conductas se puede considerar un conflicto de intereses. Para estudiar este tipo de conflictos entre animales se recurrió una vez más al mundo de la economía y al marco de la teoría de juegos.

La teoría de juegos fue desarrollada por el matemático John Von Neumann y el economista Oskar Morgenstern en los años cuarenta y trata de entender cuáles, de los posibles comportamientos, son los mejores en un conflicto entre varios jugadores o en una situación de cooperación entre jugadores. No solo trata de averiguar cuál es la mejor jugada para ganar, sino la mejor para no quedar derrotado y qué situaciones de empate, o equilibrio, existen en cada situación. Aunque el nombre de teoría de juegos podría dar a entender que esto solo se ha utilizado en conflictos triviales, la realidad es que el alcance de la teoría ha sido muy amplio y ha llegado a determinar el curso de la humanidad en varias ocasiones, como, por ejemplo, en la crisis de los misiles de Cuba durante la Guerra Fría. Contaremos brevemente cómo fue aquello y el papel de la teoría de juegos en este suceso histórico.

En octubre de 1962, tras años de conflictos con Cuba por las reformas socialistas impulsadas y tras el intento de invasión en la bahía de Cochinos de 1961, Estados Unidos descubrió que Cuba había permitido que la Unión Soviética instalase bases de misiles nucleares en la isla. Estos misiles

podrían alcanzar prácticamente cualquier punto de Estados Unidos en un tiempo muy corto. Ante esto, no podía permanecer impasible, sino que debía reaccionar de alguna manera y, así, mostrar que no temía a la URSS. Estados Unidos se planteó la posibilidad de establecer un bloqueo naval alrededor de la isla, que tratase de impedir que los soviéticos siguiesen llevando material militar. El problema era que si llevaba a cabo su plan, la URSS también tendría que reaccionar para no mostrarse débil y, ante el bloqueo, tendría tres posibles respuestas: 1) respetar el bloqueo y darse la vuelta, 2) seguir colocando misiles en Cuba y esperar que realmente no hubiese ningún tipo de ataque por parte de Estados Unidos, o 3) responder con un ataque militar a los barcos o a otros objetivos como Berlín occidental. Esta última opción, de ser la elegida, podría llegar a desencadenar el inicio de la Tercera Guerra Mundial. El escenario no podría ser más complicado. Para decidir su estrategia, Estados Unidos utilizó el análisis matemático de las posibles situaciones de acuerdo con la teoría de juegos y, finalmente, optaron por establecer el bloqueo y mostrar al contrario que no tenían miedo a ir a la guerra. La estrategia, en realidad, trataba de coaccionar a la URSS para que abandonase su plan. Y así sucedió: la Administración de Jrushchov acabó negociando con la de Kennedy para reconducir la crisis. Ambas partes acabaron cediendo en algunas cuestiones y la URSS retiró sus misiles de Cuba.

En biología evolutiva, la teoría de juegos fue introducida por el teórico de la biología evolutiva John Maynard-Smith y también ha tenido un amplio impacto, ya que se ha utilizado para explicar cómo los distintos fenotipos, que equivaldrían a las jugadas o estrategias que, a modo de rusos y estadounidenses, compiten entre sí. En el caso del comportamiento y de la comunicación, cada señal puede considerarse un fenotipo y, por tanto, una estrategia susceptible de ser analizada en un juego. La diferencia es que, mientras que en las interacciones económicas y humanas se conciben a los jugadores como racionales y conocedores de todas

las situaciones posibles, en el juego evolutivo los jugadores, los animales, portan un fenotipo que no ha sido elegido de forma racional ni conocen todos los posibles resultados que tiene el conflicto. El resultado es fruto del conflicto entre fenotipos y de la actuación de la selección natural; en este caso, dependiente de la cantidad de fenotipos diferentes que existan en esa población.

Uno de los aspectos más estudiados en evolución ha sido la búsqueda de estrategias evolutivamente estables, una situación de equilibrio en la que una serie de estrategias conviven en una población y hacen imposible que sea *invadida* por una nueva estrategia alternativa. En otras palabras, una situación evolutiva que permanece en el tiempo, en la que varios fenotipos (estrategias) conviven a la vez en la población.

Veamos el caso de la lagartija de costado manchado (*Uta stansburiana*) que vive en Norteamérica. Los machos de esta especie tienen tres fenotipos distintos en el color de la garganta; unos son naranjas, otros azules y otros amarillos. En todos los casos, el fenotipo se hereda del padre. Además, cada uno de estos fenotipos desarrolla una estrategia conductual distinta a la hora de reproducirse. Los machos de fenotipo naranja tratan de defender un territorio lo más grande posible, en el que también vivan muchas hembras con las que copular. Los azules, por su parte, defienden un territorio más pequeño, y centran sus esfuerzos en cortejar a pocas hembras y en hacer "guarda de pareja", es decir, vigilar que no se acerquen otros machos a sus parejas. Los amarillos, ni defienden el territorio ni a las parejas, se dedican a tratar de pasar desapercibidos, por su parecido por las hembras, y a colarse en los territorios ajenos y cortejar a las hembras que allí se encuentran. En definitiva, el naranja tiene una estrategia territorial, el azul una estrategia de vigilancia y el amarillo una estrategia de sigilo.

Las tres estrategias conviven a la vez y, de hecho, esta combinación de roles territoriales también se ha visto en otras especies de lagartos, incluso ibéricos como la lagartija

carpetana (*Iberolacerta cyreni*), pero en este caso estas estrategias no están ligadas a un morfo fenotípico ni son una estrategia definitiva en la vida del animal, sino algo que parece que desarrolla cada macho en función de su edad y de las capacidades reproductivas que posee. Lo sorprendente de la lagartija de costado manchado es que la abundancia de individuos de cada uno de los fenotipos depende del número de individuos que hubiese de los otros fenotipos en la generación anterior. Por ejemplo, si un año la mayoría de individuos son naranjas, estarán tan centrados en defender el territorio de cada uno y en luchar entre sí, que los amarillos pueden aprovechar para entrar sigilosamente en los territorios y copular con las hembras que allí se encuentran. La consecuencia de esto es que, en la siguiente generación, la mayoría de machos serán amarillos. En este momento, los azules empiezan a coger ventaja, porque ante una mayoría de lagartos amarillos que tratan de copular con las hembras de los demás, los azules tienen éxito por centrarse en defender y vigilar a unas pocas hembras a las que los amarillos no podrán acercarse. En la generación siguiente, habrá mayoría de azules. Pero, en este caso, los naranjas, que dominan fácilmente a los azules, tienen la oportunidad de enfrentarse y vencer a machos azules y conquistar un territorio muy grande lleno de hembras. En la siguiente generación habrá mayoría de naranjas y el ciclo comienza otra vez.

Este proceso fue descubierto y estudiado a fondo por Barry Sinervo, quien lo llamó el juego de piedra-papel-tijera, por su similitud con el juego que conocemos: naranja gana a azul, azul gana a amarillo, amarillo gana a naranja. Este es un caso especial en el que la situación de estabilidad evolutiva se da por la existencia de una dinámica dependiente de la frecuencia de cada una de las tres estrategias y que permite que el ciclo de coexistencia de las tres estrategias se mantenga. Además, el fenotipo de los machos no está solo determinado por el color de la garganta, sino que asociadas a estos rasgos también hay diferencias fisiológicas, como la cantidad de testosterona, que es muy alta en el

fenotipo naranja y por eso es más agresivo y promiscuo que los azules, que además son más pequeños en tamaño. Los rasgos de colores son una expresión del estado interno del animal y podrían estar constituyendo un rasgo señalizador, una señal.

CAPÍTULO 6

Señales del más acá

Puede que por analogía directa con el habla humana, cuando se comenzó a estudiar la comunicación animal parece que se dio por hecha la existencia de un intercambio de información entre el emisor y el receptor. Puede que también haya influido en esta idea el uso de la metáfora del conducto para explicar los sistemas comunicativos. Este modelo, utilizado inicialmente para exponer el funcionamiento del telégrafo, probablemente sea conocido por el lector o lectora porque lo aprendió en el colegio: explica que un emisor codifica y envía una señal a un receptor que, a su vez, decodifica, procesa y ejecuta una respuesta en función de la señal recibida. Este esquema ha sido el modelo básico para explicar la comunicación humana y animal, y probablemente seguirá siéndolo, aunque muchos investigadores son críticos con su uso porque creen que no es más que un constructo artificial que encorseta las explicaciones y limita nuestra compresión de lo que realmente está sucediendo en los animales. En este capítulo, aunque recurriremos a la metáfora del conducto, vamos a tratar de quitarnos los corsés y a romper los límites para entender que la comunicación en la mayoría de los animales parece estar muy lejos de un intercambio de información. Para ello es adecuado recordar algunos conceptos que ya hemos tratado en capítulos anteriores y que, ahora, cobrarán más sentido todavía. Recordémoslos rápidamente:

- Variabilidad: los animales, aun siendo de la misma especie, difieren en su morfología, comportamiento y también en sus capacidades de percibir estímulos y de emitir señales.
- Señales: son los comportamientos o estructuras del animal emisor que han evolucionado y adquirido función comunicativa porque provocan una respuesta en el receptor.
- Eficacia biológica: vivir supone el desafío de tratar de sobrevivir lo suficiente como para reproducirse y dejar descendencia. Pero, desde un punto de vista evolutivo, lo importante es sobrevivir y reproducirse más que el resto. No se trata de llegar a tener descendencia, sino de tener más hijos que los demás, para que mis genes sean mayoría en la siguiente generación.
- Costes: los costes de vivir (y de comunicarse) son inevitables, pero lo que cada uno puede costearse es diferente dependiendo de su calidad genética, cómo ha sido su desarrollo, la calidad de su alimentación, las enfermedades que ha pasado… Si desarrollar un comportamiento concreto es tan costoso que el animal no se lo puede permitir, o bien no lo realiza (está fuera de su alcance) o, si lo realiza, muere (y no es seleccionado). También en la naturaleza, las hipotecas se acaban pagando.
- Beneficios: los beneficios pueden contabilizarse también para cada actividad que el animal lleva a cabo, pero, en términos globales, consideramos que un animal obtiene un beneficio positivo cuando ha conseguido asumir los costes y, aun así, es capaz de tener mayor eficacia biológica que los demás.
- Estrategias: el conjunto de los comportamientos que los animales realizan para enfrentarse a las dificultades que se van encontrando en su ambiente.
- Adaptativo: un rasgo o una estrategia adaptativa es la que incrementa la eficacia biológica del individuo que la lleva a cabo. No quiere decir que si se posee ese rasgo o se adopta esa estrategia se tendrá éxito y se incrementará la eficacia

biológica, sino que, en un contexto ecológico concreto y dependiendo de las otras estrategias que existen en la población, la estrategia es adaptativa *en promedio*; la mayoría de los individuos de la población que la utilizan incrementan su eficacia biológica.

El conducto al revés

Comencemos por darle la vuelta al conducto: la condición primera para que pueda evolucionar un sistema comunicativo es que exista un animal que perciba estímulos. Si no existe la capacidad de percibir un estímulo, da igual el catálogo de potenciales señales que existan, porque nadie podrá recibirlas y reaccionar a ellas.

Recordemos lo que mencionábamos en el capítulo 1 acerca de cómo los animales perciben y reaccionan a los estímulos ambientales. Estos estímulos, cuando son sociales, pueden tener o no función comunicativa. Son comunicativos si un animal (emisor) envía una señal y otro animal (receptor) la recibe. O son estímulos no comunicativos (indicios) si no hay señalización, sino una liberación involuntaria de información social; es decir, cuando un animal (que llamaremos actor para diferenciarlo del emisor) realiza una actividad cotidiana que es percibida por otro animal (que llamaremos reactor para diferenciarlo del receptor).

Es importante destacar que las consecuencias ecológicas para el animal que detecta los estímulos, reactor o receptor, no dependen de si son comunicativos o no, sino de cada caso concreto. Dicho de otra manera, la eficacia biológica de reactores y receptores se verá afectada dependiendo de si, en cada momento, es beneficioso o perjudicial detectar y reaccionar/responder frente a un estímulo dado. Por ejemplo, un animal capaz de percibir la presencia amenazante de un depredador, por lo general, se verá más beneficiado que otro que no llegue a percibirla. O, yendo más allá de la mera percepción, se beneficiará más aquel animal que

huya cuando perciba una amenaza que otro que, aunque también perciba la amenaza, permanezca en el sitio y probablemente acabe siendo cazado; aunque, a su vez, la estrategia de permanecer quieto puede ser más beneficiosa que responder al estímulo dirigiéndose hacia él, donde la muerte está asegurada. Con este trabalenguas de estímulos, respuestas y beneficios queremos decir que detectar o responder ante un estímulo no tiene por qué ser beneficioso y que la estrategia más adaptativa en cada caso dependerá del contexto en el que el animal se encuentre. La percepción de estímulos y las reacciones o respuestas también han sido seleccionadas.

Pero, pongámonos en el otro lado del conducto, en el de la generación de los estímulos. Aquí sí podemos distinguir *a priori* dos situaciones ecológicas muy distintas entre los animales que producen el estímulo, dependiendo de si es una interacción comunicativa (el emisor) o liberación involuntaria de información social (el actor). Se espera que el emisor obtenga un beneficio si el receptor responde a la señal de una manera adecuada, mientras que el actor probablemente se vea perjudicado si el otro animal llega a percibirle. Veamos un ejemplo de estas diferencias. Una de las señales más extendidas en el reino animal, pero que es tremendamente diversa y que adquiere muchísimas formas, es la de los regalos nupciales para atraer y cortejar a individuos del otro sexo. Aunque no siempre tiene que ver con comida, en muchos casos, los regalos nupciales son ofrendas como insectos, frutos, semillas, etc. Si, utilizando esta señal de mostrar la comida, el emisor consigue copular con su pareja, obtiene un beneficio claro: se beneficia de la respuesta del receptor. Pero en el caso de un actor que come delante de otros y, sin poder evitarlo, revela la existencia de comida, se arriesga a perderla o a tener que compartirla: el beneficio entonces no existe. Es esta distinción entre diferentes intereses de cada uno de los agentes implicados en cada caso, emisores-receptores y actores-reactores, la que nos

pone sobre la pista de algunos procesos en los que la evolución ha podido ir actuando.

Ritualización de señales, ¿el origen ceremonial de la comunicación?

En los albores de la etología, investigadores como Julian Huxley o Konrad Lorenz plantearon que el origen evolutivo de la comunicación animal podría deberse a un proceso que llamaron ritualización, y lo denominaron así porque durante el mismo, lentamente, los movimientos se irían haciendo más repetitivos, más estereotípicos, más automáticos…, de manera similar a como sucede en los rituales humanos religiosos o militares. La ritualización podría darse si un animal realizase un comportamiento cotidiano como acicalarse, respirar, olfatear, defecar, etc., delante de otros animales que, potencialmente, pudiesen percibirlo y reaccionar ante él. Si esta reacción supusiese una ventaja adaptativa para ambos animales sería esperable que poco a poco fueran siendo seleccionados los individuos que hubiesen participado de este tipo de interacción. El proceso, paso a paso, sería algo así:

- Un animal (actor) hace un movimiento relacionado con la limpieza de su cuerpo en presencia de otros animales.
- Ese movimiento es percibido como un indicio por otro animal (estímulo no comunicativo).
- El animal (reactor) reacciona ante el estímulo del movimiento de alguna forma, en relación al primer animal (actor).
- Ambos animales se benefician de lo sucedido.
- Todo el proceso se repite en otras ocasiones y esta repetición contribuye a que poco a poco se estereotipe.
- Dado que ambos se benefician de la existencia de esta ceremonia, tendrán más descendencia y, probablemente, sus hijos también hereden la predisposición a integrarse en un ritual similar.

- Poco a poco, el comportamiento de limpieza se va optimizando para que el beneficio de la interacción sea mayor y acaba por dejar de tener esa función para pasar a tener función comunicativa (señal).

El principal cambio es que la conducta inicial deja de tener la función que tenía para convertirse en una señal. Por ejemplo, el cuidado de las plumas en un ave podría acabar siendo parte de los movimientos señalizadores en un cortejo sexual. En este proceso, poco a poco se van seleccionando otros elementos morfológicos o comportamentales que contribuyen a que los movimientos se vuelvan más llamativos, más repetitivos o los hagan redundantes. Todo ello serviría para facilitar que el receptor respondiese más fácilmente a la señal que al indicio que originó la interacción y se incrementa su eficacia biológica.

El proceso de ritualización se propuso en una época en que la tendencia científica era describir el comportamiento de los animales utilizando etogramas: un catálogo visual de todos los movimientos que realiza un animal en una conducta concreta, como por ejemplo acicalarse, comer o cortejar. Además, muchos de los estudios se centraron en las aves anátidas como patos y gansos. Puede que, por todo esto, la ritualización encaje mejor en un contexto de comunicación visual y acústica, pero puede resultar un poco extraña en la comunicación química donde son los compuestos lo que constituyen las señales y no las conductas en sí. Sin embargo, el acto de dejar la marca química, como orinar o defecar en un lugar concreto para marcar territorio, sí puede considerarse una conducta que pudo actuar como sustrato sobre el que se construyó la señalización. La idea clave detrás de esto es que el proceso original por el que un indicio se convierte en señal comienza porque los individuos tienen diferentes modos de comportarse y de percibir las conductas de los demás. Y esa variabilidad en comportamiento y percepción supone, a su vez, diferencias individuales en eficacia biológica, de manera que comportamientos y percepciones que son seleccionados han acabado constituyendo interacciones comunicativas.

Sesgos sensoriales y preferencias, ¿el origen subliminal de la comunicación?

¿Por qué un receptor comenzaría, en primer lugar, a responder a una señal concreta? Una de las principales explicaciones que se han dado, pero no la única, es que el animal receptor tendría una predisposición, una tendencia natural, para detectar y responder ante estímulos similares a aquellos en los que está codificada la señal. Bajo este concepto conviven tres hipótesis que, aunque difieren en pequeños detalles, en esencia dicen lo mismo: que el receptor comienza a responder a la señal porque la confunde con otra cosa ante la que responde habitualmente. Son las hipótesis del sesgo sensorial preexistente, de la explotación sensorial y de la trampa sensorial.

Decir que existe una preferencia por un estímulo concreto antes de que existiese la señal es quedarnos en la superficie. Para ir al fondo de la cuestión debemos preguntarnos: ¿por qué existiría esa preferencia anterior? Probablemente su origen esté, como en el caso de la ritualización, en la percepción de indicios en un contexto diferente de aquel en el que ahora se utiliza la señal. Recurramos, una vez más, a una situación hipotética para entenderlo: imaginemos un pájaro que vive en un bosque frondoso del interior de Europa. Este pájaro es de color pardo verdoso, un color que ha sido seleccionado porque le ayuda a camuflarse entre los árboles y arbustos. Durante cierta época del año, esta especie se alimenta de bayas rojas, los famosos frutos del bosque. Además, tiene una imagen de búsqueda muy clara para encontrar alimento: un punto rojo intenso sobre un fondo de color verde-pardo. Ahora, por cuestiones del azar y la variabilidad intrínseca al proceso evolutivo, supongamos que aparece un individuo mutante de la misma especie que tiene una mancha roja en el centro de su pecho verde-pardo; un patrón similar a la imagen de búsqueda de los frutos rojos. ¿Sería plausible que los otros pájaros tuviesen una tendencia natural a acercarse a este pájaro mutante pensando que es un fruto? Sí, y ese sería el sesgo sensorial preexistente que provoca la respuesta ante ese

estímulo. Es preexistente porque la percepción y la respuesta han sido seleccionadas de manera previa a la existencia del mutante, por la ventaja que les confería en un contexto ecológico distinto al comunicativo, como es la búsqueda de alimento. Si el emisor fuese un macho y el receptor una hembra, podría entenderse que el macho está *explotando* los órganos sensoriales de la hembra para atraerla o que está haciéndola caer en una *trampa sensorial*. Esta situación que hemos descrito es solo una situación hipotética, pero si en el curso de la evolución se han seleccionado aquellos individuos que, por el hecho de percibir y responder ante ciertos indicios, han incrementado su supervivencia, no es nada descabellado que exista una tendencia natural a responder ante ciertas señales cuando estas son similares a los estímulos que los hacían sobrevivir. De aquellos barros, estos lodos.

De manipuladores y lectores de mentes

Los investigadores Richard Dawkins y John Krebs propusieron, a finales de los años setenta, la teoría que podría eliminar de una vez por todas la idea de que existía un intercambio cooperativo de información entre emisor y receptor: el emisor al enviar una señal no estaría compartiendo información con el receptor, sino que estaría tratando de manipularle o influir en él para beneficiarse de la respuesta que provoca su señal. Veamos un ejemplo para entenderlo mejor. La culebra viperina (*Natrix maura*) presente en toda la península ibérica, es una especie que, como su propio nombre vernáculo indica, posee un aspecto y comportamiento parecido al de las víboras. La conducta y el aspecto de la culebra pretenden confundir a potenciales atacantes; no informarlos, sino manipularlos para que piensen que es una víbora y disuadirles de su caza. En este caso, el beneficio obtenido por el emisor al manipular al receptor es muy claro: sobrevivir.

Otro caso de manipulación del receptor es la explotación del sesgo sensorial que explicamos en el apartado anterior.

Podríamos decir que, en ese caso, el emisor manipula al receptor haciéndole creer que reacciona ante un estímulo, por ejemplo de olor a comida, cuando en realidad lo hace ante otro que no tiene nada que ver, como las feromonas de un macho. En realidad, el emisor no tiene un plan maquiavélico de manipulación del receptor, sino que adquiere una ventaja al coincidir el canal y la sintonía de la señal enviada con el canal y la sintonía que el receptor ya utilizaba. Hablamos de manipulación porque el receptor responde ante algo que no es a lo que hasta el momento había respondido. Pensémoslo en términos evolutivos: serán seleccionados (conseguirán mayor eficacia biológica) los emisores que emiten la señal que los receptores pueden detectar y provocar así una respuesta que beneficia al emisor.

Pero, si está siendo manipulado, ¿tiene sentido que esperemos que el receptor responda? ¿Cómo puede ser adaptativo responder a una señal manipulativa? Aunque están involucrados en una interacción, los beneficios (en términos de eficacia biológica) del receptor con respecto al emisor debemos considerarlos de forma diferente. El emisor se beneficia de la influencia que ejerce en el receptor pero, en promedio, el receptor también se beneficia de responder. O, al menos, no le perjudica el hacerlo. Ser manipulado no implica que siempre se vaya a pagar un coste tal que se reduzca la eficacia biológica. Y si así fuera, se establecería una *carrera* en la que los receptores que más a menudo consiguen escapar de la manipulación son seleccionados y, a la vez, son seleccionados los emisores que mejor manipulan.

Aunque hablemos de manipulación o influencia, no podemos atribuir intenciones ni motivaciones humanas a los animales en el proceso comunicativo. No sabemos, ni podemos saber, cuáles son las intenciones del emisor y el receptor. Lo único que podemos saber es que existen algunos mecanismos que promueven que la eficacia biológica de cada uno sea mayor (beneficio) o sea menor (perjuicio) que la de los que no emiten las señales o no responden a ellas en cada caso. O, dicho de otra forma, que aquellos que emitieron o respondieron

dejaron mayor número de descendientes que aquellos animales que no lo hicieron y que, dado que la capacidad de emitir y responder fue también heredada por sus crías, ellas también salieron beneficiadas y, poco a poco, el sistema comunicativo se fue estableciendo. Es a los mecanismos o a los procesos que sucedieron a lo que llamamos manipulación, lectura mental. Porque, igual que no podemos saber si un animal tiene la motivación de manipular o de adivinar, ¿podemos saber si tiene la capacidad de interpretar la información de las señales y darle significado tal y como entendemos nosotros la semántica?

¿Signos sin significado?

¿Qué pensaría nuestro lector si le dijese que la información contenida en las señales animales es irrelevante para el receptor? El envío e intercambio de información es algo tan cotidiano en el lenguaje y la comunicación humana que plantear la posibilidad de que no exista tal cosa en los sistemas comunicativos animales es algo que puede parecer una locura. No quiere decir que las señales sean sobre aspectos aleatorios ni que carezcan de un significado o valor informativo, sino que el significado de las señales solo tiene sentido informativo para los humanos que actuamos como observadores externos, pero probablemente no lo tenga para los animales implicados en la interacción comunicativa. Dedicaremos la parte final del capítulo a tratar de explicar que este planteamiento es razonable, que tiene sentido dentro del marco evolutivo y no es para nada descabellado.

Dawkins y Krebs fueron de los primeros en sugerir que quizás fuese conveniente abandonar por completo el concepto de información en las explicaciones ecológicas de la comunicación animal. Ellos veían que en este juego de emisores y receptores, lo relevante era a quién favorecía la selección natural, independientemente de la información contenida en las señales. Otros investigadores estuvieron de acuerdo en este

enfoque y se apoyaron también en que definir adecuadamente la información parece imposible.

Frente a esta escuela, se situaban otros investigadores que reivindicaban el uso del concepto de información y lo consideraban imprescindible para describir adecuadamente lo que sucede cuando dos animales se comunican. A la vez, argumentaban que el problema no es la definición de información como una entidad abstracta, algo que consideraban innecesario porque no es más que una propiedad o característica inherente a la interacción entre emisor y receptor. Sin embargo, algunas de las nociones de información pueden ser útiles.

La información puede contemplarse desde un sentido técnico-matemático, como aquello que permite reducir la incertidumbre sobre un mensaje enviado. Esta noción proviene del contexto de la teoría de la información de los matemáticos Claude E. Shannon y Warren Weaver. Simplificándolo muchísimo: antes de recibir la información, la incertidumbre es mucho mayor que después de recibirla. Por ejemplo, si llaman al portero automático de mi casa, la incertidumbre acerca de quién será es del 100% antes de preguntar quién es; o si espero a alguien, la incertidumbre puede que sea menor, pongamos del 50%. Pero, una vez me contestan y obtengo información la incertidumbre se reduce muchísimo, puede que hasta el 0% si reconozco la voz. De igual manera, los animales, a medida que reciben información de su entorno en forma de señales o estímulos, reducen la incertidumbre acerca de lo que sucede a su alrededor o de las características del emisor. Parece lógico pensar esto y, de hecho, es uno de los argumentos que utilizamos en el primer capítulo para explicar la existencia de percepción sensorial. Pero podría ser que el animal no esté reduciendo incertidumbre acerca de nada, sino que simplemente esté respondiendo a estímulos que detecta del ambiente o del emisor, que esa respuesta sea adaptativa porque le permite incrementar su eficacia biológica y que la reducción de incertidumbre sea únicamente algo que detectamos nosotros como

observadores externos. ¿Incertidumbre con respecto a qué? Acerca del contenido de la señal, de su significado.

Aclaremos que, en comunicación animal, normalmente mensaje equivale a señal, pero no a significado. El significado de la señal, el contenido en un sentido semántico es aquello que se concluye de la señal, lo que de manera cotidiana concebimos por información. Como observadores externos nosotros podemos concluir, a partir de la señal, que existe una correlación entre un comportamiento o rasgo del emisor (señal) y una cualidad del emisor (salud, capacidad defensiva…) o un suceso o elemento ambiental (comida, presencia de un depredador…) que nos indica el posible significado. Un par de ejemplos reales nos ayudarán a entenderlo mejor:

En los ciervos (*Cervus elaphus*), la frecuencia del berrido está correlacionada negativamente con el tamaño de su cuello, ya que el berrido es más grave en los ciervos que tienen el cuello más largo. De modo que, estudiando las características del berrido, podemos inferir el tamaño del ciervo. El significado que le atribuimos al estímulo es el de ciervo grande, mediano o pequeño en función lo que escuchemos.

Un macho de lagarto ocelado (*Timon lepidus*) presenta elevadas proporciones de vitamina E en sus secreciones femorales y nosotros, como observadores externos, además detectamos que este rasgo está presente en aquellos machos que tienen una alta capacidad inmunológica. Podemos deducir el significado de esta relación: la presencia de vitamina E en las secreciones de machos de lagarto ocelado indica que tienen un sistema inmune fuerte.

Podemos imaginarnos que un ciervo llega a decidir su comportamiento al escuchar el berrido de un competidor utilizando un razonamiento como el siguiente: dado que el berrido del ciervo que escucho es muy grave, su tamaño es enorme y si me enfrento a él voy a perder; o que una hembra de lagarto ocelado que elige pareja razone: este macho huele a vitamina E, por lo que tiene un sistema inmune

fuerte y si me apareo con él, mi descendencia se beneficiará de ello. Pero es poco plausible. Lo razonable, y más parsimonioso, es pensar que aquellos ciervos que respondieron de forma adecuada al sonido, enfrentándose únicamente a los rivales que podían vencer, son los que fueron seleccionados; o que las hembras que se vieron atraídas por los olores de los machos más sanos tuvieron mayor descendencia. Y precisamente porque las respuestas fueron adaptativas, la emisión de esos estímulos se llegó a convertir en una señal.

Esta información con sentido adaptativo es lo que se conoce como información funcional. Este concepto fue propuesto por Enrique Font y Pau Carazo, los investigadores españoles que más han contribuido a este debate. Ellos abogan por no perder la noción de información en el estudio de la comunicación animal y no ven incompatible, sino necesario, integrar los conceptos de manipulación del receptor y de transferencia de información. La clave de su planteamiento es que pone el énfasis en el aspecto adaptativo de la información contenida en la señal, en que para que se origine y se mantenga en la evolución, tanto emisor como receptor tienen que haber incrementado su eficacia biológica como consecuencia de haber asumido sus respectivos papeles comunicativos.

La información, así vista, no dejaría de ser algo que nosotros como observadores externos detectamos como parte del proceso evolutivo y no algo que, necesariamente, extrae el receptor. Algunos investigadores, como Michael J. Owren y Drew Rendall, han propuesto algo que va un paso más allá: que la información no existe en el proceso comunicativo animal como algo que se envía o está contenido dentro de la señal, sino única y exclusivamente como un proceso que tiene lugar en los animales receptores que son capaces de responder a los estímulos (señales o indicios) que perciben. Es el concepto de que la información se extrae, se infiere, se aprende, se predice…, pero no se envía. De esta forma, incluso nosotros seríamos, de alguna manera, receptores o perceptores de la señal, capaces de extraer su significado:

la información contenida en ella en forma de rasgos fisiológicos o genéticos del emisor o en la forma de sucesos encadenados. Pero si para emisor y receptor no hay un significado *tangible*, ¿cómo pueden saber si las señales son verdaderas o falsas?

CAPÍTULO 7

Las máquinas de la verdad

El poeta español del siglo XIX Ramón de Campoamor es recordado en la cultura popular por los versos finales de su poema "Las dos linternas":

> Y es que en el mundo traidor
> nada hay verdad ni mentira:
> todo es según el color
> del cristal con que se mira.

¿No existe la verdad? ¿No existe la mentira? En el mundo de la comunicación animal se dan, sin lugar a dudas, ambas. Hay animales tramposos que producen señales falsas, pero también hay animales honestos. Aunque puede que en una cosa sí que tuviese razón don Ramón, el receptor y el "color del cristal con que se mire" influyen en si podemos considerar que la señal es verdadera o falsa.

Con la mentira por delante

Entendemos que un animal miente cuando emite señales que no se corresponden con lo que parece que señalizan. O, dicho de otra manera, cuando sus señales son falsificaciones. Iguales

que los bolsos o zapatillas falsos que pueden encontrarse en los rastros o mercadillos, que se parecen mucho a los productos originales, pero que son mucho más baratos y de peor calidad. Las señales falsas puede que también sean mucho más baratas y de peor calidad que las originales. En el diccionario se define el acto de mentir como inducir a error, fingir, aparentar y falsificar, y exactamente eso es lo que hacen algunos animales que adoptan el *mimetismo batesiano*. Estos animales, que son completamente inofensivos, tratan de ser miméticos, de imitar a otros animales que son peligrosos o venenosos.

Dos ejemplos paradigmáticos son la inofensiva falsa serpiente coral (*Lampropeltis triangulum*) que, por su coloración roja, blanca-amarilla y negra, imita a las venenosas serpientes de coral (de los géneros *Calliophis, Sinomicrurus, Leptomicrurus, Micrurus y Micruroides*); o las moscas de la familia Syrphidae, que tienen un gran parecido con las avispas o las abejas. O el caso de la culebra viperina, del que ya hemos hablado en el capítulo anterior. Ese es el mimetismo batesiano —llamado así en honor al entomólogo Henry Walter Bates—, es decir, mimetizarse con un animal peligroso para confundir al depredador y evitar ser comido. Es una mentira de la que el emisor obtiene un beneficio, como protegerse del depredador, sin producir daño.

Existen otros casos en los que el emisor se beneficia de la respuesta del receptor, pero causándole un gran perjuicio. Por ejemplo, utilizando señuelos para confundir y atraer a receptores ilusos. Uno de los más fascinantes es la estrategia que utilizan algunos mejillones de agua dulce de Norteamérica para poder atraer a algunos peces. Estos mejillones, de la familia Unionidae, dependen de algunos peces para completar su ciclo vital. Sus larvas, los gloquidios, son bivalvos en miniatura que se enganchan a las branquias de los peces para parasitarlos hasta que estén desarrollados. Las hembras adultas sacan una porción de su cuerpo fuera de las valvas y simulan con su movimiento el

aspecto de una apetecible presa como un cangrejito (*Cambarunio iris*) o un pez (*Lampsilis ornata*) que está posado sobre la concha del mejillón. Ambos señuelos están preparados para que, en el momento en que un pez depredador los toque para comérselos, una nube de gloquidios sea expulsada directamente contra él para engancharse a sus branquias. Si esta adaptación resulta impresionante, el caso de *Lampsilis perovalis* es todavía más sorprendente. Este mejillón también utiliza un señuelo con forma de pez, en este caso es una masa gelatinosa donde se encuentran las larvas pegadas. Sin embargo, esta especie, en vez de mantener el señuelo pegado a las valvas, lo saca completamente para que se asemeje a un pez nadando. El señuelo, mientras *está nadando*, se mantiene unido al mejillón con unos hilos de mucílago, como si estuviese volando una cometa subacuática.

Otro ejemplo también bastante sorprendente del uso de señuelos es el que utiliza la serpiente iraní *Pseudocerastes urarachnoides* como técnica de caza. Esta especie es conocida vulgarmente como serpiente cola de araña, lo que nos revela su estrategia: mientras el color de su cuerpo está adaptado para camuflarse entre las rocas, la punta de su cola tiene el color y la forma de una araña. Además, la serpiente mueve la cola imitando el movimiento de la araña corriendo. Solo tiene que esperar tranquilamente al sol y mover la cola tranquilamente en espera de que algún pájaro iluso se acerque para capturar la araña y convertirse en el cazador cazado.

Estos últimos ejemplos de señales engañosas muestran cómo el emisor utiliza las señales para hacer caer al receptor en una trampa. También son claros ejemplos de manipulación del receptor y de las trampas sensoriales y, puede que, debido a estos casos de engaño, la manipulación del receptor ha sido entendida como algo que causa un perjuicio al receptor. Pero, como ya vimos, no tiene por qué ser necesariamente así.

Lo que sí es necesario para que puedan darse estas señales engañosas es la preexistencia de otras señales o de animales

a los que parecerse. Solo se puede falsificar algo cuando anteriormente existe algo verdadero que funciona. Por eso, Font y Carazo, en un artículo cuyo título es un claro homenaje a la canción *Communication breakdown* de Led Zeppelin, proponen que a los animales que engañan se les considere "emisores parásitos", dado que las falsificaciones de señal parasitan la existencia de otras señales verdaderas.

¿A qué nos referimos por señal verdadera? ¿Cómo distinguir cuándo una señal es verdadera y cuándo no? William Searcy y Stephen Nowicki (2005), autores de uno de los libros de referencia sobre el engaño en la comunicación animal, proponen dos criterios para saber si una señal es honesta. El primer requisito establece que alguna característica de la señal debe estar comúnmente relacionada con algún rasgo del emisor o su ambiente. Es decir, que debe existir una correlación o correspondencia entre lo que la señal expresa, en términos de cualidades concretas de la señal (intensidad de color, frecuencia de sonido, proporción de un compuesto…) y un rasgo del emisor (éxito reproductivo, capacidad de combate…) o del ambiente (presencia de depredadores, de comida...). Siendo este segundo componente el que, a nosotros como observadores externos, nos aporta el significado, la información semántica, de la señal. El segundo criterio establece que también el receptor debe beneficiarse de responder a la señal, no solo el emisor, como en las señales engañosas. El emisor se beneficiaría de la respuesta del receptor y este, a su vez, o bien de las consecuencias de responder a la señal o bien de la información extraída de la misma. En cualquier caso, este beneficio, como en otras ocasiones, se entiende en términos de incremento de la eficacia biológica.

Pero en un contexto en el que todos tratan de obtener el máximo beneficio al menor coste, ¿no sería más ventajoso para el emisor ser un manipulador mentiroso? ¿Por qué existen señales honestas? Estas dos preguntas han traído de cabeza a las mejores mentes del ámbito de la ecología del comportamiento. Vamos a tratar de exponer, a continuación, las principales razones que se han dado para explicar estos sucesos.

Intereses comunes

La consideración fundamental de la que debemos partir es preguntarnos qué tipo de interacción se da entre emisor y receptor. ¿Comparten intereses? En ese caso, tendría sentido que el emisor señalizase de forma honesta, porque engañar sería contraproducente y perjudicaría tanto al emisor como al receptor. Por ejemplo, si están emparentados. El biólogo británico Bill Hamilton propuso que podría interesar a ambos apoyarse emitiendo una señal de alarma para alertar de la presencia de un depredador y, así, incrementar mutuamente su eficacia biológica. Si un ave emite una señal de alerta para avisar a sus sobrinos de la presencia de un depredador, aun poniéndose en peligro al llamar la atención del depredador, incrementaría de forma indirecta su propia eficacia biológica, en comparación con la eficacia biológica del resto de individuos de la población con los que no está emparentado. Los intereses comunes compartidos son, en este caso, tratar de que sean heredados los genes comunes. No tiene sentido engañar, sino ser honesto. Aquí los intereses que confluyen y la ventaja adaptativa que se adquiere se deben al vínculo familiar, por eso a esto Hamilton lo llamó selección de parentesco.

Otro caso en el que se podría pensar que los intereses pueden ser compartidos, es cuando una hembra y un macho quieren sacar a la prole adelante. *A priori*, aquí no debería haber conflicto de intereses porque las crías tienen la mitad de genes del padre y la otra mitad de la madre. Pero podríamos tener en cuenta otros factores, como la inversión energética que hace cada uno de ellos en sacar adelante a las crías. Las hembras tienen la balanza inclinada a su favor desde el principio si se ocupan de una parte de la gestación que los machos no podrán realizar (pero esto no sucede en todas las especies animales). Entonces, aunque los intereses sean iguales, puede que los costes sean distintos y eso suponga una situación que influya en la comunicación. No siempre los intereses convergen, ya que como vimos en el capítulo 3, la

mayoría de los casos de interacción comunicativa suponen un conflicto y, entonces, las razones para la honestidad son más complicadas.

Garantías de calidad

John Maynard-Smith y David Harper plantearon la existencia de señales que no son falsificables porque, sencillamente, las limitaciones fisiológicas o anatómicas que se dan para poder emitirlas lo impiden. Ellos llamaron índices a estas señales y explicaban que la imposibilidad de falsificación se debía a que la correlación entre la cualidad de la señal (intensidad del color, frecuencia del sonido, proporción del compuesto…) y lo señalizado (calidad genética, fuerza, sistema inmune…) estaba determinada por una restricción física que establecía una relación de causa-efecto. La señal emitida solo podía ser de esa forma y las diferencias entre señales se debían a diferencias físicas entre individuos.

Aunque ellos plantearon que los índices eran indicadores de calidad individual, la existencia de señales cuya honestidad es debida a restricciones físicas no tiene por qué limitarse a aquellas que informan acerca de la calidad individual. El ejemplo paradigmático es el del berrido del ciervo, un sonido cuya frecuencia depende de la longitud y tamaño de las cuerdas vocales y de la longitud del cuello; siendo el sonido final un conjunto de frecuencias sonoras que es indicativo del tamaño corporal del ciervo que emite el berrido. Pero ¿qué pasaría si, hipotéticamente, apareciese un ciervo mutante con cuello similar al de una jirafa? El berrido sería similar al de un ciervo enorme pero, en realidad, su tamaño sería mucho más pequeño. ¿La señal habría sido falsificada? Definitivamente sí, pero porque la relación entre el tamaño corporal del ciervo y la frecuencia de su berrido no estarían relacionados en este caso. Maynard-Smith y Harper argumentaron que un índice no es falsificable mientras se encuentre en un equilibrio evolutivamente estable y, además, esté fijado en la población. La

aparición del ciervo mutante supondría un cambio en las reglas del juego y en el contenido de la señal, pero nada impide que en el futuro pudiera llegar a fijarse en la población un índice que significase "cuellos aún más grandes".

Aunque Maynard-Smith y Harper hablaban de restricciones físicas, estas también podrían ser químicas o fisiológicas. Hay un tipo de señales que tiene su mayor restricción en lo que el animal es capaz de desarrollar por su propia condición. Bajo el término "condición" se comprende el estado fenotípico del animal, su historia de vida, la edad, la carga parasitaria, las reservas energéticas, la capacidad de su sistema inmune… La condición es la capacidad que tiene un animal de mantenerse sano, incluso cuando se enfrenta a condiciones ambientales adversas (patógenos, hambruna, estrés térmico e hídrico, presencia de depredadores…). También, para los animales no humanos la salud es lo primero y por eso destinarán sus principales recursos a este respecto, y puede que eso afecte a la emisión de sus señales. Son señales dependientes de la condición. Puede que dos individuos idénticos genéticamente tengan, *a priori*, la misma capacidad de producir cierta señal, pero que al haber pasado por distintas situaciones en la vida como enfermedades, alimentación, etc., su capacidad de emitir una señal sea diferente. Veamos un ejemplo real: los machos de lagartija carpetana (*Iberolacerta cyreni*) que han pasado por una enfermedad inducida experimentalmente presentan menor proporción de provitamina D en las secreciones femorales que los machos que no han pasado la enfermedad. Probablemente esto se deba a que los machos enfermos necesitaron mayor cantidad de vitamina D para hacer funcionar su sistema inmune y no pudieron destinarla a las señales químicas. Dado que la proporción de provitamina D en las secreciones femorales de la lagartija carpetana parece que está restringida por las necesidades del sistema inmune de cada macho, podría ser que estuviésemos también ante un índice.

En este punto debemos volver a hablar de los costes y los beneficios. Las señales, en función de los costes que le suponen al emisor, son de dos tipos: las de coste mínimo y las de

coste añadido. Las primeras son aquellas señales en las que la inversión que hace el emisor es la estrictamente necesaria para que la señal llegue al receptor de una forma eficaz, es decir, lo que cuesta superar las restricciones que impone el medio en el que se emite la señal (agua, aire…). Antes nos hemos referido a ese coste como el coste de eficacia. Por otro lado, están las señales de coste añadido, que son aquellas en las que el emisor debe pagar un coste mayor del necesario, en términos de tipo energético, de riesgo o de recursos, para que la señal sea fiable. Estos costes, llamados estratégicos, incrementan el *precio* más allá de los costes de eficacia, es decir, que no todos los individuos puedan permitirse pagar ese coste es lo que asegura que la señal sea honesta. Dicho de otra forma, a los individuos de buena calidad señalizar no les supondrá apenas dificultad, mientras que será algo muy difícil de alcanzar para los individuos de baja calidad, probablemente porque deban destinar los recursos a otros asuntos imprescindibles para sobrevivir (salud, homeostasis…).

Este tipo de señalización es la que planteó el biólogo israelí Amotz Zahavi al hablar del principio del hándicap. Esta teoría trata de explicar el sentido evolutivo de las señales fijándose en aquellas que son tan ostentosas o arriesgadas que hacen difícil la supervivencia. Dos ejemplos de este tipo de señales que han sido paradigmáticos son la cola del pavo real (*Pavo cristatus*) y los saltos que dan algunas gacelas de Thompson (*Eudorcas thomsonii*) cuando detectan a un depredador. En el primer caso, la cola sería un estorbo enorme que impediría el vuelo y la huida eficaz y, en el segundo, la gacela desperdiciaría energía útil para una posterior huida y se pondría en riesgo al exhibirse delante del depredador. ¿Qué sentido evolutivo tienen? ¿Por qué son adaptativos estos rasgos y comportamientos? ¿Por qué han sido seleccionados? Zahavi planteó que son señales que pretenden mostrar al receptor que el emisor es capaz de pagar el coste de una desventaja, ya sea *de serie* como la cola del pavo o *autoinducida* en el momento, como los saltos de la gacela.

El principio del hándicap fue primero rechazado y ridiculizado para acabar siendo aceptado ampliamente y ser tomado por la norma en el mantenimiento de la honestidad de las señales. El planteamiento de Zahavi constituyó una verdadera revolución en la comprensión de la comunicación animal. Era un argumento novedoso y complejo de entender, que expuso en 1975 sin utilizar modelos matemáticos, algo que para muchos fue una muestra de que no era una explicación válida. Incluso el gran teórico de la evolución y del comportamiento animal John Maynard-Smith tuvo muchísimos reparos en aceptarlo. Hubo que esperar hasta 1990, cuando Alan Grafen publicó la modelización matemática del hándicap para que el principio se aceptara ampliamente.

Aunque todavía hoy hay algunas voces que se empeñan en argumentar que el principio del hándicap es erróneo, actualmente, el problema no es teórico sino de evidencias experimentales que podrían poner en duda casos concretos de lo que se consideraban costes de señalización. Por ejemplo, algunos experimentos recientes no han encontrado diferencias ni en el coste energético ni la capacidad de vuelo en pavos reales con cola larga y con cola recortada. Esto no quiere decir que, en el caso del pavo real, haya sido descartado el hándicap o que no exista ningún tipo de coste asociado a la cola; las leyes de la física nos siguen indicando que es más costoso volar con cola grande que con cola pequeña, pero aparece la duda de si los costes que normalmente se atribuían a la cola son realmente tan relevantes. Estos experimentos muestran lo necesario que es volver sobre cuestiones que parecen evidentes y resueltas, pero, en todo caso, siguen haciendo falta muchas evidencias. En el próximo capítulo hablaremos del hándicap en el contexto en el que se propuso: la selección sexual.

Otros costes que podrían estar influyendo en la honestidad de la señal son los costes sociales, que son aquellos que muestran las potenciales consecuencias evolutivas que supone ser un mentiroso. Imaginemos una población en la que todos los animales señalizan de forma honesta, ¿no sería más ventajoso ser un mentiroso y sacar partido de ello? Imaginemos,

también, que los machos señalizan su capacidad de combate por medio de una señal colorida, cuanto más verde, más fuerza tienen y mejor pelean. Ahora imaginemos que en esta población aparece un individuo mutante que es un mentiroso; tiene menos fuerza y pelea peor, pero es capaz de producir una señal verde que es igual que la de los mejores machos. ¿Qué pasará? ¿Ganará? Veamos cuatro situaciones: en un primer combate entre dos machos diferentes pero honestos (la señal verde indica verdaderamente su capacidad de combate), vencerá el macho más fuerte y con la señal más verde, ya sea porque le ha derrotado en combate o porque el macho más débil ha huido al ver la señal de su oponente. En un segundo combate entre dos machos honestos y la misma capacidad de combate y señal con el mismo verde, ganará uno de los dos, ninguno de ellos huirá al ver la señal del contrario y el vencedor de la pelea será probablemente determinado por el azar. ¿Qué pasará si se enfrentan dos machos, uno honesto y uno mentiroso, con el mismo color verde pero dos capacidades de combate distintas? Pues lo más probable es que acabasen enfrentándose y, dado que la capacidad de combate del honesto es mayor, el mentiroso saldría perdiendo. En este caso, ser un mentiroso no sale a cuenta. ¿Y si el mentiroso se enfrentase a un macho honesto más débil que él? Probablemente, el honesto acabaría huyendo y entonces el mentiroso habría ganado.

Dentro de la misma población en la que aparece el mentiroso, los individuos que responden también son variables y coexistirán los que siempre y los que se enfrentan. Aunque surgiese el mentiroso supremo que señalizase un verde tan intenso que, teóricamente, nadie se atrevería a luchar contra él, es altamente probable que algún individuo se acabe enfrentando al mentiroso, revelando la mentira y beneficiándose de ello. Aunque ser mentiroso pudiese suponer una ventaja en un momento dado y se conservase en la descendencia, el verde de los honestos seguiría siendo el más heredado y el que finalmente prevalecería en la población.

Además de que cada individuo, en función de lo que es capaz (de sus capacidades para señalizar), pague un precio

distinto por señalizar, Searcy y Nowicki plantearon que la honestidad de una señal podría ser asegurada únicamente por la diferencia en los beneficios que los emisores y los receptores obtienen de ella. Las señales seguirían siendo costosas, pero el beneficio obtenido por cada uno sería distinto. Por ejemplo, en los pollos de las aves cuando realizan llamadas de petición a los padres para obtener comida, para la misma cantidad de comida obtendrán un beneficio mayor los pollos que estén más desnutridos que los pollos que están bien alimentados.

Por último, se plantea como mecanismo social de honestidad la unión de la experiencia con el escepticismo, el ensayo y el error aplicado al conocimiento entre individuos. Explicado principalmente en un contexto de lucha entre machos, los individuos recordarían las señales y los individuos con los que se hubieran enfrentado en el pasado aprenderían y, a la hora de responder a las señales, actuarían en consecuencia. La honestidad se mantendría siguiendo el principio del proverbio árabe que reza "la primera vez que me engañes, será culpa tuya; la segunda vez, la culpa será mía".

CAPÍTULO 8

¿Por qué lo llaman comunicación cuando quieren decir sexo?

La vida, ella siempre con sus estratagemas
con tantas gemas tan imprevistas
creó una lista de pelos y de poemas
de dientes y de sistemas para la conquista.
El mundo se llenó de colorido,
de llamados y gemidos se llenó el viento
desde el día aquel en que la naturaleza
inventó el amor, su mejor invento.
"El plan maestro", Jorge Drexler

El sexo es, a la vez, inspiración, origen y respuesta de muchas de las grandes preguntas evolutivas y de la ecología del comportamiento. Doce años después de la publicación de *El origen de las especies por medio de la selección natural*, Darwin publica *El origen del hombre y la selección en relación al sexo*. En la segunda parte de esta obra, se centró en explicar el origen de los caracteres sexuales secundarios. Aquellos rasgos que están implicados en la reproducción, pero no de forma directa como los genitales, sino que están relacionados con la atracción y la elección de pareja o con la lucha con los competidores. Muchos de estos rasgos son demasiado extravagantes, ostentosos y una verdadera dificultad para sobrevivir, por lo que Darwin puso en duda que hubiesen podido haber evolucionado por selección natural. Planteó que, si estaban implicados en el sexo, debían de haber sido seleccionados por la propia actividad sexual. Propuso que la selección podría producirse dentro del mismo sexo, por la competencia entre machos, y entre sexos, por la selección de pareja por parte de la hembra. Los machos pelean entre sí por dominarse y por exhibirse delante de las hembras, que son las que eligen con qué macho copular.

Ya nos hemos referido a estos procesos en el capítulo 5, donde explicamos su origen y que, en algunas especies,

pueden darse en el otro sentido: como competencia entre hembras y elección de pareja por el macho. Ahora regresamos a ellos porque, probablemente, sean dos de los procesos ecológicos donde más interacciones comunicativas se producen; y es el contexto en el que cuestiones relacionadas con la comunicación animal han surgido. En este capítulo conoceremos las distintas teorías que explican las interacciones sexuales y veremos si son aplicables a la comunicación animal en general.

Competencia entre machos

En las especies territoriales, los machos compiten entre sí por obtener un territorio de calidad en el que haya recursos, pocos depredadores y muchas hembras con las que copular. Darwin hacía referencia en *El origen del hombre* a varios datos de aves migratorias, salmones, batracios e insectos en los que los machos llegaban antes que las hembras a los lugares de reproducción; mi experiencia personal con lagartijas ibéricas de varias especies es la misma. Sin embargo, por prudencia científica, no me atrevería a afirmar que existe un patrón definitivo sobre qué sucede primero, si la presencia de hembras en el territorio o la conquista y defensa de una zona por los machos a la que luego acuden las hembras.

En otras especies menos territoriales puede que la lucha violenta por un pedazo de terreno no sea tan evidente, pero eso no evita que los machos compitan entre sí. La lucha es por fecundar los óvulos de las hembras y existe competencia antes de la cópula, con enfrentamientos físicos y exhibiciones de cortejo, y después de copular, en la competición entre los espermas por llegar a fecundar al óvulo y evitar que el de los otros machos lo haga. La competencia poscópula se da en el tracto genital de la hembra y, aunque sujeta a interesantísimos procesos de selección, no tiene apenas relevancia en los aspectos comunicativos, por lo que en este apartado nos centraremos en la competencia entre machos antes de que se produzca la cópula.

En definitiva, los combates entre machos y las interacciones sociales llevan asociada una plétora de rasgos y comportamientos que influyen en cómo comienza, cómo se produce y cuál es el resultado de cada enfrentamiento. Esos rasgos son los susceptibles de ser considerados señales que habrían sido seleccionadas, precisamente, por ser más efectivas en este contexto de competencia.

Para comprender cómo se producen estas interacciones competitivas, imaginemos una población de animales cualesquiera al inicio de la primavera; momento en que muchas especies animales dejan el letargo invernal y comienzan su temporada reproductiva. Los machos poco a poco van tomando posiciones y evaluando el terreno en busca del mejor territorio en el que pueden establecerse. Es probable que muchos coincidan en los lugares elegidos para establecer su territorio y comiencen a enfrentarse por su conquista. ¿Cómo se producirán esos enfrentamientos? Puede que dos machos se peleen, sencillamente, porque uno se ha acercado al lugar que a otro le interesa y, entonces, el territorio se lo acabe quedando el macho que gane. Pero ¿sería factible hacer eso con todos los machos que se acercasen? Enfrentarse con todos los machos tendría un coste elevadísimo en términos de energía, porque superar una pelea tras otra debe ser agotador y no se está igual de fresco en el primer combate que en el último. Pero, también, en términos de riesgo, ya que, cuantas más luchas haya, mayor riesgo habrá de salir herido de ellas. Desde luego, el ensayo y el error y la lucha desaforada no parecen ser una estrategia muy acertada desde un punto de vista evolutivo por sus costes elevadísimos y una probabilidad de éxito muy baja. No solo es necesario defender un territorio, también es necesario conservar energía y salud para copular y, en algunos casos, cuidar a las crías. Combatir con todos y cada uno de los machos de la población es un claro derroche energético y una estrategia con muy baja probabilidad de éxito.

No obstante, los sucesivos enfrentamientos entre los machos servirían para hacer una evaluación de los rivales y establecer una cierta *jerarquía de dominancia*, como sucede en

muchas especies. En ella, los vencedores se sitúan en las capas más elevadas y los que pierden con más frecuencia en las capas más bajas. Aunque también hay quien argumenta que la jerarquía es un constructo humano, la realidad es que es posible concluir un orden jerárquico o una red de dominancia a partir de las victorias y las derrotas en los enfrentamientos entre machos. Estas jerarquías se han encontrado en muchísimos grupos animales que van desde insectos hasta primates, por lo que es probable que tenga relevancia ecológica. Podrían constituir la manera de hacer más asequible la conquista del territorio al reducir el número de enfrentamientos necesarios para medirse con el rival.

Es habitual encontrar que el rango de dominancia se correlaciona con algún rasgo de los machos; por ejemplo, en algunas aves la correlación suele darse con el tamaño de ciertas manchas o parches de color en el plumaje, o con alguna propiedad del color, como el brillo, la intensidad, el reflejo UV… Podría ser, también, que los animales utilizasen este tipo de rasgos para reconocer a los rivales y, una vez se han enfrentado y han podido evaluar su capacidad de combate, utilizar la memoria para decidir si debería enfrentarse a ellos o no la próxima vez que se encuentren. El reconocimiento, a diferencia de los combates indiscriminados, puede ser una estrategia válida para evitar enfrentamientos indeseados y ahorrar costes. Siguiendo ese refrán español de "más vale lo malo conocido que lo bueno por conocer", los animales se benefician de saber a quién tienen por vecino. Reconocer al rival evita pagar costes innecesarios en luchas de las que ya se conoce el resultado, tanto al animal dominante como al dominado. Por todo ello, esta teoría recibe el nombre del reconocimiento del querido enemigo.

Pero ¿es esta la mejor estrategia posible para evitar enfrentamientos? No. Cuando detectamos que algunos rasgos, como el tamaño de las manchas de color en el plumaje, se correlacionan con la dominancia, es inevitable pensar que dichos colores podrían ser señales. ¿Qué indicarían esas señales? Pues, probablemente, la capacidad de combate o el rango

en la jerarquía, de manera parecida a como funcionan las insignias de los uniformes militares. De hecho, este tipo de señales suele recibir el nombre de insignias de estatus. Si existiese una señal honesta que sirviese para que los machos pudiesen averiguar la capacidad de combate de su enemigo, los beneficios se dispararían porque el coste se reduciría al mínimo y solo se pagaría en los enfrentamientos en los que realmente hubiese posibilidades de obtener una victoria; mientras que los enfrentamientos entre machos que están en los extremos de la jerarquía no tendrían lugar. Estas señales, en muchas ocasiones, están relacionadas con la salud y la condición; aspecto que ya Darwin planteaba al proponer que estas señales indicaban el vigor de los machos.

Pero en la naturaleza siempre es todo más complejo y en las poblaciones animales parece que los tres sistemas (evaluación del rival por enfrentamiento, reconocimiento del querido enemigo y señalización por insignias de estatus) actúan al mismo tiempo. De la misma forma, separar completamente si las señales y el éxito de los machos se deben a la competición entre ellos o a ser atractivos para las hembras es imposible. En el siguiente apartado, nos centraremos en la elección de pareja, pero sin olvidar que, a la vez, se da una fuerte competición entre machos.

Elección de pareja

Los caracteres sexuales secundarios fueron definidos por primera vez por John Hunter, unos veinte años antes de *El origen de las especies*, como aquellos rasgos que no tenían relación directa con la reproducción, pero que sí estaban implicados en la actividad sexual. Darwin trató de explicar su origen por medio de la selección sexual. Él apreció que, por lo general, el macho está "más modificado" que la hembra, es decir, que tiene muchos más ornamentos; atribuyó esta diferencia a las fuertes pasiones de los machos y vio en ellas la razón de las luchas frente a otros machos y de las exhibiciones frente a las hembras.

En muchos casos, los machos que vencen a otros machos no obtienen la posesión de las hembras, independientemente de la elección por parte de estas. El cortejo de los animales no es en manera alguna breve y sencillo como podría pensarse. Las hembras se excitan más, o prefieren emparejarse, con los machos más ornamentados, o con los mejores cantantes, o con los que hacen las mejores cabriolas; pero es muy probable, tal y como se ha observado recientemente en algunos casos, que prefieran al mismo tiempo los machos más vigorosos y vivaces. Así, las hembras más vigorosas, que son las primeras en reproducirse, podrán escoger entre muchos machos; y, aunque no siempre seleccionen al más fuerte o al mejor armado, seleccionarán aquellos que son vigorosos y bien armados, y en otros aspectos, sean los más atractivos (*El origen del hombre y la selección en relación al sexo*, Charles Darwin, 1871).

En este párrafo encontramos la base de casi todas las ideas que vamos a relatar a continuación y que nos han llevado al entendimiento que tenemos actualmente de la comunicación animal en la selección de pareja.

Los ornamentos, los cantos, las mejores cabriolas… son rasgos que se consideran ostentosos, exagerados. Es decir, que suponen tal riesgo o derroche de energía que lo más lógico es que no existiese, que hubiesen sido cercenados por la selección natural. Por ejemplo, en las secreciones químicas de muchos lagartos encontramos sustancias que son muy valiosas para mantener la homeostasis metabólica, como la vitamina E, que tiene función antioxidante, o la provitamina D3 y el ergosterol, que mantienen fuerte el sistema inmune, o el ácido oleico, que es un ácido graso insaturado de alta calidad. Que compuestos de ese tipo aparezcan en unas secreciones que se expulsan al exterior como si fuesen excreciones es un alarde ostentoso y exagerado. Y su rol como señal parece claro, ya que tanto las hembras de lagartija lusitana (*Podarcis guadarramae*) como las de lagartija carpetana (*Iberolacerta cyreni*) se sienten atraídas por las secreciones de los machos que contienen más proporción de ácido oleico y provitamina D3.

Las secreciones químicas son un caso de ornamento sexual poco evidente, pero en la naturaleza hay ejemplos mucho

más llamativos. Uno de los más sorprendes es el de los pájaros pergoleros que habitan en Australia y en Nueva Guinea. Lo alucinante de estos pájaros no es que tengan colores muy llamativos o que hagan danzas y cabriolas, sino que construyen estructuras muy complejas y de una sorprendente coherencia cromática para atraer a la hembra y realizar su exhibición.

Por ejemplo, el pergolero satinado (*Ptilonorhynchus violaceus*) despeja una zona del terreno y construye una especie de escenario al aire libre, cuya parte delantera suele estar tapizada con elementos del mismo color, como plumas, piedras, hojas, cristales, plásticos… además, construye con ramitas secas dos paredes a modo de bambalinas que forman una especie de pasillo por el que el macho hará su entrada triunfal al escenario y, así, deslumbrar a la hembra. O el pergolero pardo (*Amblyornis inornata*) que construye una cabaña de ramitas con techo que tiene aspecto de teatro o de portal de Belén, cuyo interior limpia con sumo cuidado para dejar únicamente la tierra a la vista y que contraste con distintos elementos coloridos que dispone en montoncitos separados según su gama cromática, o formando alfombras en la entrada de la pérgola. En todos los casos, estas estructuras llaman la atención de la hembra y son visitadas por ella y, entonces, el macho constructor realiza su exhibición aprovechando el marco incomparable que ha construido.

Sin duda, estos procesos fisiológicos o comportamientos tan extravagantes han sido seleccionados porque provocan una fuerte influencia en las hembras y por ello las consideramos señales. ¿Por qué atraen a las hembras? ¿Qué es lo que tienen que tanto les gusta? Una respuesta simple hablaría de que es bonito, por estética, pero en realidad es que las preferencias y respuestas antes estos estímulos nos indican que, probablemente, en esos comportamientos exista algo que ha beneficiado a sus antepasados y por eso se ha mantenido.

Antes de seguir debemos plantearnos qué es lo más beneficioso para las hembras; pregunta que no tiene una respuesta simple y única. Puede que observemos una atracción por las señales de machos parecidos a la hembra y que conduzcan a

un apareamiento, llamado concordante. Consideremos, por ejemplo, que observamos que en una población animal es habitual que se emparejen los individuos de tamaño similar, pero no los de tamaño diferente. Este emparejamiento concordante puede darse porque existe una limitación física que impida copular a dos animales que son muy diferentes en tamaño y que solo puedan aparearse los grandes con los grandes y los pequeños con los pequeños. O que estemos ante una situación en la que los individuos que más combates ganan son los que más territorio obtienen y las hembras más grandes sean las que acceden a esos mismos territorios…

Obviamente, también se ha detectado el caso opuesto, en que las hembras se ven atraídas por las señales de machos muy diferentes, por ejemplo, a nivel genético. En algunas especies animales se ha detectado que existe preferencia por el olor de los individuos que tienen un complejo mayor de histocompatibilidad (CMH) muy diferente al propio. El CMH es una familia de genes que codifican distintos antígenos, las moléculas que sirven para que el sistema inmune pueda reconocer distintos patógenos y activar la defensa. Un aspecto a tener en cuenta es que los genes del CMH son tremendamente variables entre individuos. Entonces, ¿a qué puede deberse esa preferencia por los que tienen un CMH muy diferente? Pues a que disponer de un catálogo más grande de genes en el CMH permitiría tener más posibilidades de defenderse de potenciales patógenos. La descendencia de una pareja con dos CMH muy diferentes entre sí tendrá un catálogo más amplio que aquella pareja que tiene dos juegos muy parecidos; y los primeros probablemente sean más resistentes a más enfermedades y sobrevivan mejor. O, dicho de otra forma, los hijos de la hembra que se vea atraída por el olor de un macho con un CMH muy distinto al suyo tendrán un sistema inmune más versátil que podría defenderse de más patógenos y, por tanto, le dará más posibilidades de sobrevivir.

Para gustos, los colores, los olores, los sonidos… La preferencia o la atracción, como todos hemos experimentado alguna vez, puede seguir derroteros muy complicados, variables e

impredecibles; también en el juego de la seducción animal para observadores externos como nosotros. En cualquier caso, las preferencias que observamos hoy en las hembras de cualquier especie animal seguramente sean un reflejo del pasado, de ventajas evolutivas que se heredaron por ser beneficiosas y contribuir a incrementar la eficacia biológica de las hembras.

Del qué, el cómo y el porqué de los rasgos exagerados

¿Qué significan los rasgos que son preferidos por las hembras? ¿Cómo llegan algunos a ser tan exagerados? ¿Son señales? ¿O son casualidades evolutivas? Ronald Fisher, uno de los genios de la matemática y la biología que nos dio el siglo XX, fue de los primeros que se planteó cómo algunos de estos rasgos llegan a ser exagerados. Según su teoría, en realidad solo hace falta que las hembras prefieran un rasgo de los machos para que este sea seleccionado y acabe siendo exagerado. Al proceso lo llamó selección *run-away*, es decir, selección desbocada. Veamos a qué se refería con un ejemplo.

Imaginemos una población de aves en la que los machos son variables en sus rasgos y en la que el emparejamiento es completamente al azar, es decir, la mayoría de las hembras no elige basándose en un rasgo de los machos en particular, sino que cada una sigue una preferencia personal distinta de la del resto. En dicha población, en un momento dado aparece una circunstancia o una presión ambiental que hace que uno de los rasgos sea seleccionado positivamente por la selección natural; es decir, aquellos individuos que tienen el rasgo pueden sobrevivir hasta reproducirse más a menudo que aquellos que no lo tienen. Por ejemplo, imaginemos que aparece un nuevo depredador que se mueve por el suelo, y que los individuos que tienen las plumas de la cola un poquito más largas y vuelan mejor son los que consiguen escapar del depredador más a

menudo. ¿Qué pasará? Que, en pocas generaciones, si el depredador sigue presente, los genes que favorecen tener la cola un poco más larga serán mucho más abundantes en la población que los de cola corta porque los individuos de cola larga habrán conseguido sobrevivir hasta reproducirse en más ocasiones que los de cola corta. Además, las hembras que más descendencia tendrán serán aquellas que, aunque sea por azar, prefieran aparearse con los machos de cola más larga porque también sus crías volarán mejor y tendrán mayores probabilidades de sobrevivir hasta aparearse.

Imaginemos ahora que la preferencia de las hembras también está ligada a un gen y, por tanto, se hereda. En ese caso las hembras que eligiesen a los machos de cola larga también tendrían hijas que prefiriesen ese rasgo. Eso significaría que el rasgo del macho (cola larga) y la preferencia de la hembra se habrían unido en los mismos individuos y sus genes se heredarían conjuntamente. Como serían esos individuos los que más se reproducirían y más crías tendrían, se entraría en un proceso de retroalimentación positiva en que, generación tras generación, al preferir las hembras las colas más largas, las colas de los machos hijos serían cada vez un poco más largas. Así el rasgo se iría exagerando de forma desbocada (de ahí el nombre) y podríamos considerar que tener la cola larga es una señal que *indica* a la hembra que el macho vuela y huye bien.

Pero ¿esa exageración desbocada sería un proceso sin fin? No, hay dos momentos que pueden parar su exageración. Por un lado, cuando la cola sea tan grande que ya no sea la mejor cola posible para el vuelo de huida, sino que algunos individuos con la cola un poco más corta son capaces de huir más a menudo y de sobrevivir más. En este caso, el tener la cola demasiado larga sería un aspecto subóptimo para la supervivencia, pero, precisamente, lo que nos interesa son los rasgos exagerados, que a pesar de ser un problema para la supervivencia siguen siendo seleccionados. Fisher planteó que, aunque el rasgo ya no sea óptimo, dado

que la preferencia de la hembra por la cola larga sigue existiendo, estos machos seguirán siendo elegidos y el rasgo continuará exagerándose. En este punto, la cola larga ya no indica "lo bien que vuela el macho" y se ha escapado de su conexión de significado con la calidad del macho. A partir de entonces, el rasgo de la cola larga sería un rasgo arbitrario, que no significa nada, salvo la cualidad de la longitud.

Pero preferir un rasgo atractivo puede ser beneficioso en sí mismo si la mayoría de la población femenina se siente atraída por él. Es la ventaja de tener hijos *sexis*. La hembra que se aparee con un macho muy atractivo tendrá hijos atractivos que, a su vez, atraerán a más hembras y tendrán mayor éxito reproductivo por el hecho de ser atractivos. Dicho de otra forma, si el atractivo del padre se mantiene en los hijos, tendrá más nietos. El rasgo puede seguir manteniéndose o potenciándose generación tras generación porque, si sigue siendo preferido por la mayoría de las hembras, es beneficioso en sí mismo.

Hay un segundo freno a la exageración. Ocurrirá cuando el rasgo sea tan sumamente exagerado, que portarlo sea sinónimo de no sobrevivir. La cola es tan sumamente larga, que no permite volar y escapar del depredador. Es el momento en el que la selección sexual deja de actuar y claudica ante la selección natural. Ese es el freno definitivo a la exageración.

El que los ornamentos exagerados sean rasgos arbitrarios sin significado alguno es algo que no es descartable del todo, pero parece plausible que sean verdaderas señales indicadoras de la calidad del macho o, como Darwin decía, indicativos del *vigor*. Entiéndase el concepto *calidad* como algo que aglutina las características genéticas, la fuerza y versatilidad del sistema inmune, la habilidad de su desempeño para vivir en un ambiente concreto, la capacidad reproductora… Todo aquello que, en comparación con los otros machos de su entorno, le hace ser más apto. Dado que los óvulos son caros y las oportunidades de reproducción de la hembra son menores que las del macho, es esperable que las

hembras que eligen al macho de mejor calidad sean las que se ven beneficiadas con una mayor o mejor descendencia. Y elegir no es gratis, tiene un coste asociado de tiempo, energía y riesgo de depredación que influye en la elección que es capaz de hacer la hembra. Si una hembra es demasiado selectiva, podría no llegar a reproducirse. Las hembras que prefieran de manera natural los ornamentos de los machos de alta calidad, pagarán menos costes en su elección porque será más automática y, además, incrementarían su eficacia biológica por haberse apareado con un macho de alta calidad y atractivo.

Parece que estamos dando vueltas sobre el mismo concepto una y otra vez, pero cada vez ampliamos un poquito más el círculo. Pero, cuando una señal es un verdadero indicador de calidad del macho, podría mantenerse en la población sin necesidad de exagerarse si las preferencias de las hembras no fuesen una moda, si la selección natural frena la exageración, si la variabilidad de los machos es muy grande o si la elección de las hembras tiene en cuenta otros factores… Entonces, ¿los ornamentos exagerados son señales?

En el capítulo anterior hablamos del principio del hándicap; una idea, rompedora en su momento, que daba un sentido comunicativo y una razón de ser a los rasgos exagerados: garantizar la autenticidad de la señal. Veámoslo poco a poco. Recordemos la cola larga del pájaro como rasgo exagerado, con una longitud tan grande que no era óptima para el vuelo. Zahavi, al contrario que Fisher, planteó que es en ese momento en el que están más ligadas la señal y la calidad del macho. Pues solo los mejores machos podrían sobrevivir con una desventaja tan grande como una cola que no es óptima para el vuelo de huida (hándicap significa desventaja). Una cola tan larga es un lastre para la supervivencia, por lo que podría estar enviando un mensaje a la hembra que dijese algo como: "Mira lo bueno que soy que, a pesar de llevar esto encima, sobrevivo". La desventaja, así vista, se convierte en un alarde. Algo que no todos pueden hacer, porque es tremendamente costoso o arriesgado; algo que

solo los que pueden hacerlo, se lo pueden permitir. Para los que son capaces, el coste es asumible, pero para los que no lo son, sería tan alto el coste que, probablemente, les costaría la vida. Imaginemos que a un macho de cola corta le ponemos unas plumas extra para simular una cola más larga. Falsificamos la expresión de la señal y, por tanto, su coste asociado. Y comprobamos si su desempeño es igual que el de un macho que tiene *de serie* una cola larga. Según el principio del hándicap, el coste que soportaría este macho por falsificar la señal sería demasiado grande y no podría costearlo. En la naturaleza sería muy difícil que pasase, pero sería el equivalente a que apareciese un pájaro mutante de baja calidad con la cola larga; lo más probable es que no tuviese fuerza suficiente para levantar una cola tan pesada y acabase siendo cazado. Dicho de otra forma, si un macho de baja calidad señalizase como si fuese de alta calidad, el simple mantenimiento o la convivencia con el rasgo señalizador le provocaría una dificultad que no podría sortear y sería cercenado por la selección natural. Resumiendo: la presencia de una señal de desventaja supone un coste añadido y, quien la porta, lo hace porque puede hacerlo: sigue vivo y coleando a pesar de esa desventaja; el precio tan alto a pagar por la desventaja, es la garantía de fiabilidad de la señal.

Puede parecer por la explicación que la expresión de las señales de las que hablamos se produce en una situación de presencia/ausencia o de *on*/*off*; pero la mayoría de las señales se producen a lo largo de un continuo de intensidad, de color, de sonido, de frecuencia, de volumen, de proporción… Por eso hablamos del nivel o grado de expresión. Generalmente, la mayoría de los machos expresan la señal, pero existen diferencias entre individuos en alguna de las características de la señal. Esa variabilidad puede deberse a factores condicionantes del propio individuo, acerca de los que, precisamente, informa la señal. Por ejemplo, la salud. Bill Hamilton y Marlene Zuk (bióloga evolutiva y ecóloga) plantearon que las señales sexuales indican la calidad de los genes y también la capacidad de lidiar con los parásitos. De

manera que las hembras preferirían las señales más intensas, que serían las de aquellos machos que pueden mantenerse más sanos, sobrevivir hasta reproducirse y producir más descendencia que los demás. Pero ¿qué pasaría si un macho está muy parasitado y, además, expresa la señal muy intensamente? Pues que la calidad de ese macho es enorme y estaría mostrando que, a pesar de estar parasitado, es capaz de producir esa señal. Sin embargo, de esto no debe concluirse que todas las señales dependientes de la condición son hándicaps, pero sí que las señales basadas en desventajas deben ser dependientes de la condición.

Hay un último tipo de señal que puede estar indicando calidad del macho y que esté actuando en la selección sexual: los beneficios directos para la hembra. En algunas especies, los machos proporcionan beneficios directos a la hembra a la hora de la reproducción, como alimento, regalos, territorio… Estos beneficios podrían ser también sujeto de la elección por parte de la hembra y, si existe alguna relación entre el valor o el tamaño del regalo y la calidad del macho que lo ofrece, o su capacidad para capturar presas, sus habilidades para los cuidados parentales…, podrían ser también una verdadera señal.

En ese capítulo hemos visto cómo la selección sexual puede actuar, más allá de la selección natural a favor de sobrevivir, para moldear los caracteres sexuales secundarios. Sería bueno aclarar que, aunque no hemos hablado de ellos, los caracteres sexuales primarios como los genitales es muy probable que tampoco escapen de la selección sexual. La distinción entre caracteres primarios y secundarios no le convencía a Darwin demasiado y, aunque ha ayudado a plantearse preguntas, puede que no sea muy necesaria actualmente. El proceso de selección sexual, o selección dependiente del sexo, es mucho más complejo de lo que hemos reflejado aquí y encomiendo al lector a consultar las obras recomendadas al final del libro, si quiere profundizar más en el tema. Especialmente los libros del biólogo evolutivo Juan Moreno y los trabajos del ecólogo Anders Møller.

No obstante, antes de finalizar nuestro viaje por la comunicación animal, pensemos una vez más en la selección sexual más moderna y en las señales que han permanecido en un segundo plano durante demasiado tiempo: los ornamentos de las hembras.

CAPÍTULO 9

El caso de los ornamentos en las hembras

No le habrá pasado desapercibido al lector que la gran mayoría de las explicaciones que se han dado hasta el momento, por no decir todas, tienen un fuerte enfoque en las señales que produce el macho y no tanto en la señalización de la hembra. Es muy probable que el momento histórico y el contexto social influyesen en Darwin cuando propuso la teoría de la selección sexual, o en Angus J. Bateman (genetista) y en Robert Trivers (biólogo) cuando vieron en la diferencia de gametos y de inversión entre sexos una explicación ecológica válida. Sin duda, estas teorías tienen un marcado carácter sexista, puesto que, precisamente, tratan de explicar las diferencias entre sexos. Sin embargo, el cuerpo de teoría que hemos ido explicando a lo largo del libro está basado en principios, observaciones y experimentaciones muy numerosas y sólidas, que han sido puestas a prueba muchas veces y que han acabado por definir el paradigma actual en la ecología del comportamiento animal. Pero, aunque sean hechos probados, están en constante revisión porque, especialmente en biología, la complejidad de los procesos es tan grande que es tremendamente difícil llegar a conclusiones definitivas. Por eso no existen leyes universales que explican lo que sucede en todos y cada uno de los casos. Como hemos visto, en la naturaleza los

procesos son muy variables, extremadamente complejos y con tantas casuísticas que difícilmente podemos reducirlos a una fórmula universal; aunque sea eso lo que tratamos de hacer los científicos.

Existen numerosos casos particulares en los que los procesos y teorías que hemos explicado no se cumplen. Empezando por los animales humanos. Las teorías, aunque hijas de su tiempo, son intentos de explicar lo que sucede en el mundo animal no humano y el paradigma que determina el corpus de conocimiento actual puede ir cambiando a medida que se vayan haciendo nuevos estudios y revisitando cuestiones ya conocidas. Por esa complejidad inherente a la biología y la ecología animal, por la volatilidad del conocimiento científico y también porque no hay ningún orden natural subyacente, cualquier traslado que se hiciese de estos planteamientos a la sociedad humana sería un despropósito. Estaríamos cayendo en la falacia naturalista si tratamos de buscar normas morales o razones éticas en las interacciones animales para justificar comportamientos humanos éticamente injustificables. Y, de la misma forma, no seríamos honestos intelectualmente si rechazamos teorías científicas razonables obtenidas a partir de datos sólidos porque ponen el foco en las diferencias biológicas que existen entre sexos. Las diferencias biológicas entre sexos existen en humanos y en animales no humanos; el problema no reside en la biología, sino en las absurdas e indeseables consecuencias sociales y culturales que los humanos hemos derivado de ellas y han llevado al supremacismo masculino.

Nosotros también somos hijos de nuestro tiempo y por eso hoy somos conscientes de que hay una parte de la comunicación animal que hemos dejado de lado por demasiado tiempo. Más de un siglo después de que Darwin enunciara su teoría de la selección natural, por fin, comienza a utilizarse un marco teórico y un lenguaje que comienza a tener en cuenta estos dos aspectos. Por ejemplo, en el uso del término *seleccionador* (*chooser*), cuando un individuo se comporta de manera selectiva en la elección de pareja, o

seductor (*courter*), cuando un individuo compite por tener más parejas, independientemente de si es macho o hembra. Esto tiene sentido no solo desde una perspectiva feminista del lenguaje, sino porque existen especies animales en las que los roles de seleccionador y seductor no son ejercidos por las hembras y los machos, respectivamente, sino al revés. Sin embargo, para facilitar la comprensión en este libro divulgativo, que pretende ser un primer acercamiento al tema, he creído conveniente mantener las denominaciones de macho para los seductores y de hembra para los seleccionadores, pues esa es la forma en la que una persona que quiera profundizar más en este tema encontrará en la práctica totalidad de los libros. El capítulo final del libro está articulado en preguntas acerca de las señales de las hembras, de los ornamentos. Ofreceremos algunas respuestas, pero es tan pequeño el cuerpo de conocimiento que tenemos sobre ello, en comparación con el que tenemos en la señalización de machos, que esas respuestas deben tomarse como hipótesis y propuestas. Ojalá, en diez años no estemos diciendo lo mismo.

¿Ornamentos en las hembras?

Las hembras, de igual manera que los machos, varían en sus rasgos fenotípicos de acuerdo con su calidad genética y con su historia de vida. Pero, en un gran número de especies animales, me atrevería a decir que en la mayoría, el aspecto de las hembras, en comparación con el de los machos, es bastante uniforme y mucho menos llamativo. De hecho, ya el naturalista británico Alfred Wallace propuso que los rasgos de las hembras podrían haber ido evolucionando desde una ornamentación llamativa hacia una más apagada porque habrían sido seleccionadas por su buen camuflaje y por pasar desapercibidas. La explicación ofrecida plantea que, dado que la reproducción estaría prácticamente asegurada, han sido seleccionadas sus habilidades

para sobrevivir, y no para competir o ser elegidas por los machos. La afirmación de que la reproducción es segura está basada en la proporción matemática entre los gametos de las hembras y de los machos y las oportunidades reproductivas que son posibles en cada caso. Y aquellas hembras que pasaran desapercibidas tendrían mayor eficacia biológica tiene sentido porque, incluso los machos, suelen *ocultar* sus ornamentos en las épocas no reproductivas. Sin embargo, no todas las hembras se reproducen y no en todas las especies animales las hembras tratan de pasar desapercibidas. En algunas especies las hembras exhiben colores, sonidos, patrones químicos… que suscitan la pregunta de si, en realidad, estos son rasgos constitutivos de señal y están implicados en la comunicación.

Monomorfismo y dimorfismo sexual

De manera general, nos referimos a las especies en las que los machos y las hembras tienen un aspecto similar como monomórficas, mientras que cuando tienen aspectos diferentes hablamos de dimorfismo sexual. En el ámbito comunicativo, estas similitudes o diferencias morfológicas no tienen por qué restringirse al aspecto general, sino que pueden darse en aspectos concretos de los ornamentos: intensidad del canto, tipo de trino, composición de la señal química, movimiento y color de alguna porción del cuerpo… Veámoslo con colores. Los ornamentos femeninos aparecen en especies monomórficas, como el guacamayo escarlata (*Ara macao*), en las que tanto machos como hembras presentan un colorido similar muy intenso que combina el rojo con el amarillo, el azul y el verde. Pero también aparecen en especies dimórficas. Puede suceder que ambos sexos posean ornamentos, pero que sean distintos, como, por ejemplo, en la cabra montesa (*Capra pyrenaica*), en la que los cuernos del macho son mucho más grandes y curvados que los de la hembra. O en que los ornamentos del macho estén prácticamente ausentes y sea la

hembra la que es llamativa, como en el pez galán (*Xyrichtys novacula*), en el que el macho tiene un color apagado, mientras que la hembra presenta colores rojos.

¿Son ornamentos sexuales?

Si hacemos un paralelismo con el origen y el significado de los ornamentos en los machos, los ornamentos de las hembras serían indicativos de calidad, habrían sido seleccionados por la elección masculina y habrían contribuido a incrementar la eficacia biológica de sus portadoras. Comencemos por el significado de los ornamentos. ¿Son indicativos de la calidad de la hembra? Como ya hemos visto, el término *calidad* refleja varios aspectos que, en el caso de las hembras, suelen hacer referencia a la fecundidad, los recursos de los que dispone, la salud y la condición, la edad, la inversión que realiza, la compatibilidad genética… Las diferencias en cada uno de estos aspectos, o en las variables relacionadas que midiésemos, se interpretarían como variabilidad en calidad de las hembras. Al igual que con los machos, lo que se ha intentado es encontrar correlaciones positivas entre estas variables y características de los ornamentos femeninos. Se han encontrado algunas; por ejemplo, en las hembras de golondrina (*Hirundo rustica*) el tamaño de la cola se relaciona con el número de pollos que salen adelante, o algunos parches de color de las hembras de ruiseñor pechiazul (*Luscinia svecica*) y de papamoscas cerrojillo (*Ficedula hypoleuca*) se relacionan con la masa corporal y el nivel de infección por parásitos. No obstante, los ornamentos podrían estar indicando aspectos distintos de la calidad; como en las hembras del lagarto australiano dragón adornado (*Ctenophorus ornatus*), en las que el color de su garganta está relacionado con la fecha de puesta y podría indicar su receptibilidad a las cópulas. Aunque puede que no sean del todo equivalentes, no es descartable que los ornamentos sean costosos y que

funcionen reglas similares a las de los ornamentos de los machos, hándicaps incluidos.

Pero, más allá de las observaciones, lo que se trata es de explicar su origen evolutivo. Hasta el momento se han ofrecido tres posibles explicaciones, compatibles y no excluyentes entre sí; son el resultado evolutivo de: 1) la elección de los machos, 2) la competencia entre las hembras o 3) la herencia asociada de los ornamentos del macho.

¿Los machos también eligen?

Cada vez hay más evidencias de que no todas las hembras se reproducen con el mismo éxito, por lo que la existencia de una elección masculina parece plausible. Es algo que apenas está estudiado y que, de existir, puede que fuese el equivalente a la elección femenina, pero de signo contrario. Como siempre se había asumido que todas las hembras se reproducían o, al menos, se pensaba que la variabilidad en su éxito reproductor era potencialmente mucho menor que en los machos, se obviaba el beneficio potencial que podría obtener un macho por ser selectivo. Sin embargo, y aunque todas las hembras llegasen a reproducirse, hacerlo con una hembra de mejor calidad en términos de fecundidad podría producir un incremento en número y calidad de las crías; al menos, en comparación con la descendencia de otros machos. Si la preferencia de los machos es por los ornamentos de aquellas hembras que mejor calidad tienen, ¿podríamos estar ante procesos similares a los que se dan en los machos como una selección de escape o un efecto de *hija sexi*? Si los machos eligiesen, podrían tener lugar sucesos parecidos, pero, siendo tan grande la diferencia en el número de gametos y, en consecuencia, en oportunidades de reproducción, es esperable que el efecto de la elección por los machos en la configuración de los rasgos de las hembras sea mucho menos intenso que cuando son las hembras las que eligen.

Pero queda mucho por saber. Podría llegar a ser distinto incluso el funcionamiento de las preferencias de los machos. Por ejemplo, mientras las hembras del pajarillo diamante mandarín (*Taeniopygia guttata*) prefieren a los machos con el pico más rojo, los machos buscan a las hembras que no tienen el pico ni muy rojo ni muy pálido. Esta simple diferencia en el funcionamiento de las preferencias influiría muy fuertemente en el sentido de la evolución de los caracteres.

¿Las hembras también compiten?

Otra de las explicaciones posibles es que los ornamentos hayan aparecido como consecuencia de un proceso de selección por competencia con otras hembras. Pero no está del todo claro si funcionarían del mismo modo que las insignias de estatus como en los machos. Hay muy pocas referencias de esta cuestión y parece ser un campo por investigar. De lo que no hay duda es que en muchas especies existe competencia entre hembras, por recursos, para sacar adelante a las crías, o por espacio, como, por ejemplo, lugares donde establecer nidos o cuidados de los machos en aves, o competencia por lugares de puesta en reptiles. No se ha estudiado en profundidad, pero no es de ninguna manera descartable el que existan insignias de estatus como en los machos, se ha visto que el color de las hembras del loro ecléctico (*Eclectus roratus*), cuyo plumaje combina el rojo con el morado, podría estar relacionado con la competencia entre hembras por ocupar distintas cavidades donde establecer el nido.

¿El lado masculino?

Una opción nada descartable, pero que, a día de hoy, también necesita de un desarrollo teórico mucho más profundo, es la propuesta de que los ornamentos femeninos son una consecuencia indirecta de que existan en los machos. Según esta

hipótesis, dado que la mitad del genoma procede del padre y la otra mitad de la madre, las hembras habrían heredado de su padre los genes necesarios para desarrollar los ornamentos. De manera que los ornamentos podrían ser la expresión fenotípica de los genes del padre. Esta hipótesis parece prometedora, pero presenta algunos problemas teóricos que no se han resuelto aún. Por ejemplo, en aquellas especies en las que la elección de la hembra se realiza por el atractivo de estos rasgos en los machos, ¿sería compatible la existencia de la misma señal en machos y en hembras?

La misma hipótesis plantea que la ausencia de los ornamentos en otras hembras se debe a que la selección natural, por medio de la depredación, ha actuado sobre aquellas hembras ornamentadas y ha seleccionado a las que pasaban desapercibidas. Pero ¿por qué habría actuado sobre ellas y no sobre los machos que tienen los mismos rasgos?

Aunque la hipótesis de una herencia de los rasgos masculinos podría ser plausible en algunos casos, es probable que exista también una diferencia de costes entre machos y hembras a la hora de producir una señal; es decir, que producir una señal es demasiado costoso para las hembras, pero posible para los machos. El problema es cómo realizar experimentos para comparar esos costes impuestos por el papel reproductivo de cada uno, ya que no se podría simular el coste de la gestación para un macho. Es necesario un desarrollo más profundo, especificar las interrelaciones con otras teorías ya comprobadas y establecidas, y pensar bien en qué casos es más probable que se esté dando. Y, aunque sea muy difícil, como con las explicaciones de la competencia entre las hembras y la elección del macho, es necesario no abandonar la vía de la investigación experimental; tanto a nivel ecológico y de interacción social animal como a nivel genético, en el que las ciencias ómicas podrían ser clave para avanzar en ello.

Empieza a parecer claro que esos rasgos podrían ser señales implicadas en la comunicación en un contexto sexual, pero también social. Es muy factible que exista un

cierto grado de elección de hembras por parte de los machos y que la competición entre hembras por recursos, parejas y otros beneficios también esté teniendo lugar. De esta forma, estarían sucediendo a la vez la elección de pareja entre sexos y la competición dentro de cada sexo, en claves diferentes pero simultáneas. Muchas preguntas quedan por contestar en este ámbito, pero no es descartable la hipótesis de que, al igual que sucede en los humanos, una selección mutua de la pareja se esté dando en un gran número de especies animales.

Bibliografía

Bradbury, J. W. y Vehrencamp, S. L. (2011): *Principles of animal communication*, Sinauer Associates, Sunderland, 2ª ed.

Carazo, P. y Font, E. (2010) "Putting information back into biological communication", *Journal of Evolutionary Biology*, 23(4), pp. 661-669.

— (2014): "'Communication breakdown': The evolution of signal unreliability and deception", *Animal Behaviour*, 87(C), pp. 17-22.

Carranza, J. (ed.) (1994): *Etología: Introducción a la Ciencia del Comportamiento*, Universidad de Extremadura, Cáceres.

— (2016): *Etología adaptativa: El comportamiento como producto de la selección natural*, UCOPress y Universidad de Extremadura, Córdoba y Cáceres.

Dall, S. *et al.* (2010): "Biological information in an ecological context", *Oikos*, 119(2), pp. 201-202.

Danchin, E. *et al.* (2004): "Public information: from noisy neighbors to cultural evolution". *Science*, 305, pp. 487-491.

Dawkins, M. S. (1995): *Unravelling animal behavior*, Longman, Essex, 2ª ed.

Dawkins, R. y Krebs, J. R. (1978): "Animal signals: information or manipulation?", en J. R. Krebs y N. B. Davies (eds.),

Behavioural Ecology: An Evolutionary Approach, Sinauer Associates, Sutherland, pp. 282-309.

Endler, J. A. y Basolo, A. L. (1998): "Sensory ecology, receiver biases and sexual selection", *Trends in Ecology & Evolution*, 13(10), pp. 415-420.

Font, E. y Carazo, P. (2010): "Animals in translation: why there is meaning (but probably no message) in animal communication", *Animal Behaviour*, 80(2), pp. e1-e6.

Futuyma, D. J. (2005): *Evolution*, Sinauer Associates, Sunderland.

Gil D. *et al.* (2015): "Birds living near airports advance their down chorus and reduce overlap with aircraft noise", *Behavioral Ecology*, 26(2), pp. 435-443.

Grafen, A. (1990): "Biological signals as handicaps", *Journal of Theoretical Biology*, 144(4), pp. 517-546.

— (2021): "A simple completion of Fisher's fundamental theorem of natural selection", *Ecology and Evolution*, 11(2), pp. 735-742.

Guilford, T. y Dawkins, M. S. (1991): "Receiver psychology and evolution animal signals", *Animal Behaviour*, 42(1), pp. 1-14.

— (1993): "Receiver psychology and the design of animal signals", *Trends in Neurosciences*, 16(11), pp. 430-436.

Hasson, O. (1997): "Towards a general theory of biological signaling", *Journal of Theoretical Biology*, 185, pp. 139-156.

Hauser, M. D. (1996): *The evolution of communication*, MIT Press, Cambridge.

Hauser, M. D. y Konishi, M. (eds.) (1999): *The design of animal communication*, MIT Press, Cambridge.

Hill, G. E. (2011): "Condition-dependent traits as signals of the functionality of vital cellular processes", *Ecology Letters*, 14(7), pp. 625-634.

Hill, G. E. y McGraw, K. J. (eds.) (2006): *Bird Coloration, Vol. 1. Mechanisms and Measurements*, Harvard University Press, Cambridge.

— (2006): *Bird Coloration, Vol. 2. Function and evolution*, Harvard University Press, Cambridge, Massachusetts.

KREBS, J. R. y DAVIES, N. B. (eds.) (1978): *Behavioural Ecology: An Evolutionary Approach*, Blackwell Scientific Publications, Oxford.

— (1984): *Behavioural Ecology: An Evolutionary Approach*, Blackwell Scientific Publications, Oxford, 2ª ed.

— (1991): *Behavioural Ecology: An Evolutionary Approach*, Blackwell Scientific Publications, Oxford, 3ª ed.

— (1997): *Behavioural Ecology: An Evolutionary Approach*, Blackwell Scientific Publications, Oxford, 4ª ed.

KREBS, J. R. y DAWKINS, R. (1984): "Animal Signals: Mind-Reading and manipulation", *Behavioural Ecology: An Evolutionary Approach*, Sinauer Associates, Sutherland, 2ª ed., pp. 380-402.

MARTÍN, J. y LÓPEZ, P. (2015): "Condition-dependent chemosignals in reproductive behavior of lizards", *Hormones and Behavior*, 68, pp. 14-24.

Mathot, K. J. y Dingemanse, N. J. (2014): "Plasticity and Personality", en Martin, L. B.; Cameron K., G. y Woods, A. (eds.), *Integrative Organismal Biology.*

MAYNARD-SMITH, J. y HARPER, D. (1995): "Animal signals: models and terminology", *Journal of Theoretical Biology*, 177(3), pp. 305-311.

— (2003): *Animal signals*, Oxford University Press, Oxford.

MØLLER, A. P. *et al.* (1998): "Sexual selection and tail streamers in the barn swallow", *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 265(1394), pp. 409-414.

MORENO, J. (2010): *Los retos actuales del darwinismo. ¿Una teoría en crisis?*, Síntesis, Madrid.

— (2013): *Evolución por selección sexual según Darwin*, Síntesis, Madrid.

ROSENTHAL, G. G. (2017): *Mate choice, the evolution of sexual decision making from microbes to humans*, Princeton University Press, Princeton.

RYAN, M. J. (2018): *El gusto por la belleza. Biología de la atracción*, Antoni Bosch editor, Barcelona.

SCHLUPP, I. (2021): *Male choice, female competition, and female ornaments in sexual selection*, Oxford University Press, Oxford.

Searcy, W. A. y Nowicki, S. (2005): *The evolution of animal communication: reliability and deception in signalling systems*, Princeton y Oxford, Princeton University Press.

Stamps, J. A. (2016): "Individual differences in behavioural plasticities", *Biological Reviews*, 91(2), pp. 534-567.

Stegmann, E. U. (ed.) (2013): *Animal communication theory. Information and Influence*, Cambridge University Press, Cambridge.

Wagner, R. H. y Danchin, É. (2010): "A taxonomy of biological information", *Oikos*, 119(2), pp. 203-209.

Weaver, R. J.; Koch, R. E. y Hill, G. E. (2017): "What maintains signal honesty in animal colour displays used in mate choice?", *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 372(1724).

Zahavi, A. (1975): "Mate selection. A selection for a handicap", *Journal of Theoretical Biology*, 53, pp. 205-214.

— (1979): "Ritualization and the evolution of movement signals", *Behaviour*, 72(1-2), pp. 77-80.

Zahavi A. y Zahavi A. (1997): *The Handicap Principle*, Oxford University Press, Oxford.

Títulos de la colección ¿Qué sabemos de?

1. **El LHC y la frontera de la física.** Alberto Casas
2. **El Alzheimer.** Ana Martínez
3. **Las matemáticas del sistema solar.** Manuel de León, Juan Carlos Marrero y David Martín de Diego
4. **El jardín de las galaxias.** Mariano Moles Villamate
5. **Las plantas que comemos.** Pere Puigdomènech
6. **Cómo protegernos de los peligros de Internet.** Gonzalo Álvarez Marañón
7. **El calamar gigante.** Ángel Guerra Sierra y Ángel González González
8. **Las matemáticas y la física del caos.** Manuel de León y Miguel Ángel F. Sanjuan
9. **Los neandertales.** Antonio Rosas
10. **Titán.** María Luisa Lara
11. **La nanotecnología.** Pedro A. Serena Domingo
12. **Las migraciones de España a Iberoamérica desde la Independencia.** Consuelo Naranjo Orovio
13. **El lado oscuro del universo.** Alberto Casas
14. **Cómo se comunican las neuronas.** Juan Lerma
15. **Los números.** Javier Cilleruelo y Antonio Córdoba
16. **Agroecología y producción ecológica.** Antonio Bello, Concepción Jordá y Julio César Tello
17. **La presunta autoridad de los diccionarios.** Javier López Facal
18. **El dolor.** Pilar Goya Laza y María Isabel Martín Fontelles
19. **Los microbios que comemos.** Alfonso V. Carrascosa
20. **El vino.** María Victoria Moreno-Arribas
21. **Plasma: el cuarto estado de la materia.** Teresa de los Arcos e Isabel Tanarro
22. **Los hongos.** María Teresa Tellería
23. **Los volcanes.** Joan Martí Molist

24. **El cáncer y los cromosomas.** Karel H. M. van Wely
25. **El síndrome de Down.** Salvador Martínez Pérez
26. **La química verde.** José Manuel López Nieto
27. **Princesas, abejas y matemáticas.** David Martín de Diego
28. **Los avances de la química.** Bernardo Herradón García
29. **Exoplanetas.** Álvaro Giménez
30. **La sordera.** Isabel Varela Nieto y Luis Lassaletta Atienza
31. **Cometas y asteroides.** Pedro José Gutiérrez Buenestado
32. **Incendios forestales.** Juli G. Pausas
33. **Paladear con el cerebro.** Francisco Javier Cudeiro Mazaira
34. **Meteoritos.** Josep María Trigo Rodríguez
35. **Parasitismo.** Juan José Soler
36. **El bosón de Higgs.** Alberto Casas y Teresa Rodrigo
37. **Exploración planetaria.** Rafael Rodrigo
38. **La geometría del universo.** Manuel de León
39. **La metamorfosis de los insectos.** Xavier Bellés
40. **La vida al límite.** Carlos Pedrós-Alió
41. **El significado de innovar.** Elena Castro Martínez e Ignacio Fernández de Lucio
42. **Los números trascendentes.** Javier Fresán y Juanjo Rué
43. **Extraterrestres.** Javier Gómez-Elvira y Daniel Martín Mayorga
44. **La vida en el universo.** F. Javier Martín-Torres y Juan Francisco Buenestado
45. **La cultura escrita.** José Manuel Prieto
46. **Biomateriales.** María Vallet Regí
47. **La caza como recurso renovable y la conservación de la naturaleza.** Jorge Cassinello Roldán
48. **Rompiendo códigos.** Manuel de León y Ágata Timón
49. **Las moléculas: cuando la luz te ayuda a vibrar.** José Vicente García Ramos
50. **Las células madre.** Karel H. M. van Wely
51. **Los metales en la Antigüedad.** Ignacio Montero
52. **El caballito de mar.** Miquel Planas Oliver
53. **La locura.** Rafael Huertas
54. **Las proteínas de los alimentos.** Rosina López Fandiño
55. **Los neutrinos.** Sergio Pastor Carpi
56. **Cómo funcionan nuestras gafas.** Sergio Barbero Briones
57. **El grafeno.** Rosa Menéndez y Clara Blanco
58. **Los agujeros negros.** José Luis Fernández Barbón
59. **Terapia génica.** Blanca Laffon, Vanessa Valdiglesias y Eduardo Pásaro
60. **Las hormonas.** Ana Aranda
61. **La mirada de Medusa.** Francisco Pelayo
62. **Robots.** Elena García Armada
63. **El Parkinson.** Carmen Gil y Ana Martínez
64. **Mecánica cuántica.** Salvador Miret Artés
65. **Los primeros homininos.** Antonio Rosas
66. **Las matemáticas de los cristales.** Manuel de León y Ágata Timón

67. **Del electrón al chip.** Gloria Huertas Sánchez, Luisa Huertas Sánchez y José L. Huertas Díaz
68. **La enfermedad celíaca.** Yolanda Sanz Herranz y María del Carmen Cénit Laguna
69. **La criptografía.** Luis Hernández Encinas
70. **La demencia.** Jesús Ávila
71. **Las enzimas.** Francisco J. Plou
72. **Las proteínas dúctiles.** Inmaculada Yruela Guerrero
73. **Las encuestas de opinión.** Joan Font Fàbregas y Sara Pasadas del Amo
74. **La alquimia.** Joaquín Pérez Pariente
75. **La epigenética.** Carlos Romá Mateos
76. **El chocolate.** María Ángeles Martín Arribas
77. **La evolución del género 'Homo'.** Antonio Rosas
78. **Neuromatemáticas.** José María Almira y Moisés Aguilar
79. **La microbiota intestinal.** Carmen Peláez y Teresa Requena
80. **El olfato.** Laura López-Mascaraque y José Ramón Alonso
81. **Las algas que comemos.** Miguel Herrero y Elena Ibáñez
82. **Los riesgos de la nanotecnología.** Marta Bermejo Bermejo y Pedro A. Serena Domingo
83. **Los desiertos y la desertificación.** Jaime Martínez Valderrama
84. **Matemáticas y ajedrez.** Razvan Iagar
85. **Los alucinógenos.** José Antonio López Sáez
86. **Las malas hierbas.** César Fernández-Quintanilla y José Luis González Andújar
87. **Inteligencia artificial.** Ramón López de Mántaras y Pedro Meseguer
88. **Las matemáticas de la luz.** Manuel de León y Ágata Timón
89. **Cultivos transgénicos.** José Pío Beltrán
90. **El Antropoceno.** Valentí Rull
91. **La gravedad.** Carlos Barceló Serón
92. **Cómo se fabrica un medicamento.** María del Carmen Fernández Alonso y Nuria E. Campillo
93. **Los falsos mitos de la alimentación.** Miguel Herrero
94. **El ruido.** Pedro Cobo Parra y María Cuesta Ruiz
95. **La locomoción.** Adrià Casinos Pardo
96. **Antimateria.** Beatriz Gato Rivera
97. **Las geometrías y otras revoluciones.** Marina Logares
98. **Enanas marrones.** María Cruz Gálvez Ortiz
99. **Las tierras raras.** Ricardo Prego Reboredo
100. **El LHC y la frontera de la física.** Alberto Casas
101. **La tabla periódica de los elementos químicos.** José Elguero Bertolino, Pilar Goya Laza y Pascual Román Polo
102. **La aceleración del universo.** Pilar Ruiz Lapuente
103. **Blockchain.** David Arroyo Guardeño, Jesús Díaz Vico y Luis Hernández Encinas
104. **El albinismo.** Lluís Montoliu José
105. **Biología cuántica.** Salvador Miret Artés
106. **Islam e islamismo.** Cristina de la Puente
107. **El ADN.** Carmen Mora Gallardo y Karel H. M. van Wely

108. **Big data.** David Ríos Insua y David Gómez-Ullate Oteiza
109. **Verdades y mentiras de la física cuántica.** Carlos Sabín
110. **La quiralidad, el mundo al otro lado del espejo.** Luis Gómez-Hortigüela Sainz
111. **Las diatomeas y los bosques invisibles del océano.** Pedro Cermeño Aínsa
112. **Los bacteriófagos.** Lucía Fernández Llamas, Diana Gutiérrez Fernández, Ana Rodríguez González y Pilar García Suárez
113. **Nanomecánica.** Daniel Ramos Vega
114. **Cerebro y ejercicio.** José Luis Trejo y Coral Sanfeliu
115. **Enfermedades raras.** Francesc Palau
116. **La innovación y sus protagonistas.** Elena Castro Martínez e Ignacio Fernández de Lucio
117. **Marte y el enigma de la vida.** Juan Ángel Vaquerizo
118. **Las matemáticas de la pandemia.** Manuel de León y Antonio Gómez Corral
119. **Ciberseguridad.** David Arroyo Guardeño, Víctor Gayoso Martínez y Luis Hernández Encinas
120. **Pensar en español.** Reyes Mate
121. **La esclerosis múltiple.** Leyre Mestre y Carmen Guaza
122. **Por qué y cómo se hace la ciencia.** Pere Puigdomènech
123. **Nanotecnología para el desarrollo sostenible.** Pedro A. Serena Domingo
124. **Los coloides.** Rodrigo Moreno Botella
125. **De la micro a la nanoelectrónica.** José M. de la Rosa
126. **Las hormigas.** José Manuel Vidal Cordero
127. **Nuevos usos para viejos medicamentos.** Nuria E. Campillo, María Mercedes Jiménez Sarmiento y María del Carmen Fernández Alonso
128. **El Neolítico.** Juan F. Gibaja Bao, Millán Mozota Holgueras y Juan José Ibáñez
129. **Los superalimentos.** Jara Pérez Jiménez
130. **El vacío.** José Ángel Martín Gago
131. **Los robots y sus capacidades.** Elena García Armada
132. **Los alimentos ultraprocesados.** Javier Sánchez Perona
133. **Las vacunas.** María Mercedes Jiménez Sarmiento, Nuria E. Campillo y Matilde Cañelles
134. **Análisis de riesgos.** David Ríos Insua y Roi Naveiro Flores
135. **La salud planetaria.** Fernando Valladares, Xiomara Cantera y Adrián Escudero
136. **La contaminación lumínica.** Alicia Pelegrina López
137. **Origen y evolución de 'Homo sapiens'.** Antonio Rosas
138. **Física cuántica y relativista.** Carlos Sabín
139. **El plancton y las redes tróficas marinas.** Albert Calbet Fabregat
140. **El café.** María Dolores del Castillo y Amaia Iriondo
141. **La nanomedicina.** Fernando Herranz Rabanal
142. **Cómo se meten ocho millones de especies en un planeta.** Ignasi Bartomeus
143. **La vida y su búsqueda más allá de la Tierra.** Ester Lázaro Lázaro

144. **Inmunonutrición**. Ascensión Marcos Sánchez, Esther Nova Rebato, Sonia Gómez-Martínez y Ligia Esperanza Díaz Prieto
145. **Inteligencia artificial y medicina**. Miriam Cobo Cano y Lara Lloret Iglesias
146. **Cómo se comunican las neuronas**. Juan Lerma
147. **Megatsunamis.** Mercedes Ferrer Gijón Títulos de la colección
148. **Encuentros temporales entre astronomía y prehistoria.** Enrique Pérez Montero y Juan F. Gibaja Bao

¿QUÉ SABEMOS DE?

Una colección de libros que acerca la ciencia y sus desarrollos tecnológicos al público general a través de sus protagonistas. El personal investigador del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) contextualiza y explica los avances del conocimiento en textos pensados para que la sociedad tenga acceso a las claves de la investigación de forma amena y directa. Desde 2009 **¿Qué sabemos de?** publica títulos sobre todas las áreas del saber que atienden tanto a temas de actualidad como a cuestiones generales de la ciencia y la tecnología.

¿de qué sirve la ciencia si no hay entendimiento?

¿QUÉ SABEMOS DE?

Cómo se comunican los animales

Descubrir el lenguaje de los animales no humanos y cómo se comunican ha sido una de las ambiciones de la humanidad desde los tiempos de Aristóteles. Y aunque el deseo de muchas personas sea, quizás, tener las habilidades para aprender a comunicarnos con ellos, la realidad es que estamos bastante lejos de hacerlo. De lo que no hay duda es de que los animales se comunican. La ecología del comportamiento lleva casi un siglo mostrando que el curso de la evolución ha ido modelando esta suerte de interacción social en las formas más variopintas: colores intensos, sonidos armoniosos, gestos desafiantes... La comunicación parece nacer de un impulso natural que los animales tenemos dentro y que comenzó hace millones de años. A través de esta obra conoceremos cómo se producen, reciben e interpretan las señales que utilizan muchos animales, así como el papel que tiene el ambiente en este proceso y cómo explica la ecología evolutiva estos fenómenos cuyo origen podría estar ligado a la necesidad de sobrevivir y reproducirse.

ISBN: 978-84-00-11189-2

9 788400 111892

GOBIERNO DE ESPAÑA
MINISTERIO DE CIENCIA E INNOVACIÓN
CSIC
EDITORIAL CSIC